



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISA *ARC FLASH* PADA SISTEM TEGANGAN
MENENGAH DI PT. SEMEN PADANG DENGAN
MENGUNAKAN METODE PERHITUNGAN YANG
DIMODIFIKASI**

Jumaras Situngkir
NRP 2213 106 041

Dosen Pembimbing
Dr. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***ARC FLASH ANALYSIS ON MEDIUM VOLTAGE SYSTEM
IN PT. SEMEN PADANG USING MODIFIED CALCULATION
METHOD***

Jumaras Situngkir
NRP 2213 106 041

Advisor

Dr. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**ANALISA ARC FLASH PADA SISTEM TEGANGAN
MENENGAH DI PT. SEMEN PADANG DENGAN
MENGUNAKAN METODE PERHITUNGAN
YANG DIMODIFIKASI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

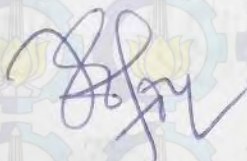
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga

Jurusan Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Ardyono Privadi, S.T., M.Eng.

NIP. 1973 09 27 1998 03 1004

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Margo Pujiyantara, M.T.

NIP. 1966 03 18 1990 10 1001



**LEMBAR PERNYATAAN
PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, yang bertanda tangan di bawah ini saya :

Nama : Jumaras Situngkir
Nrp. : 2213106091
Jurusan / Fak. : Teknik Elektro / FTI
Alamat kontak : Jl. Kejawan Gebang 693 No 27
a. Email : cinink7st@gmail.com
b. Telp/FHP : 085292330200

Menyatakan bahwa semua data yang saya *upload* di Digital Library ITS merupakan hasil final (revisi terakhir) dari karya ilmiah saya yang sudah disahkan oleh dosen penguji. Apabila dikemudian hari ditemukan ada ketidaksesuaian dengan kenyataan, maka saya bersedia menerima sanksi.

Demi perkembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (Non-Exclusive Royalty-Free Right)** kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Analisa Arc Flash Pada Sistem Tegangan Menengah Di PT. Semen Padang Dengan Menggunakan Metode Perhitungan Yang Dimodifikasi

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya berhak menyimpan, mengalih-media/format-kan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta. Saya bersedia menanggung secara pribadi, segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya Ilmiah saya ini tanpa melibatkan pihak Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Surabaya

Pada tanggal : 27 Juni 2016

Yang menyatakan,

Dosen Pembimbing 1

Dr. Ardiono Priyad, S.T., M. Eng.

NIP. 197109271990631004

Jumaras Situngkir

Nrp. 2213106091

KETERANGAN :

Tanda tangan pembimbing wajib dibubuhi stempel jurusan.

Form dicetak dan diserahkan di bagian Pengadaan saat mengumpulkan hard copy TA/Tesis/Disertasi.

Analisa *Arc Flash* Pada Sistem Tegangan Menengah Di PT. Semen Padang Dengan Menggunakan Metode Perhitungan Yang Dimodifikasi

Jumaras Situngkir
2213 106 041

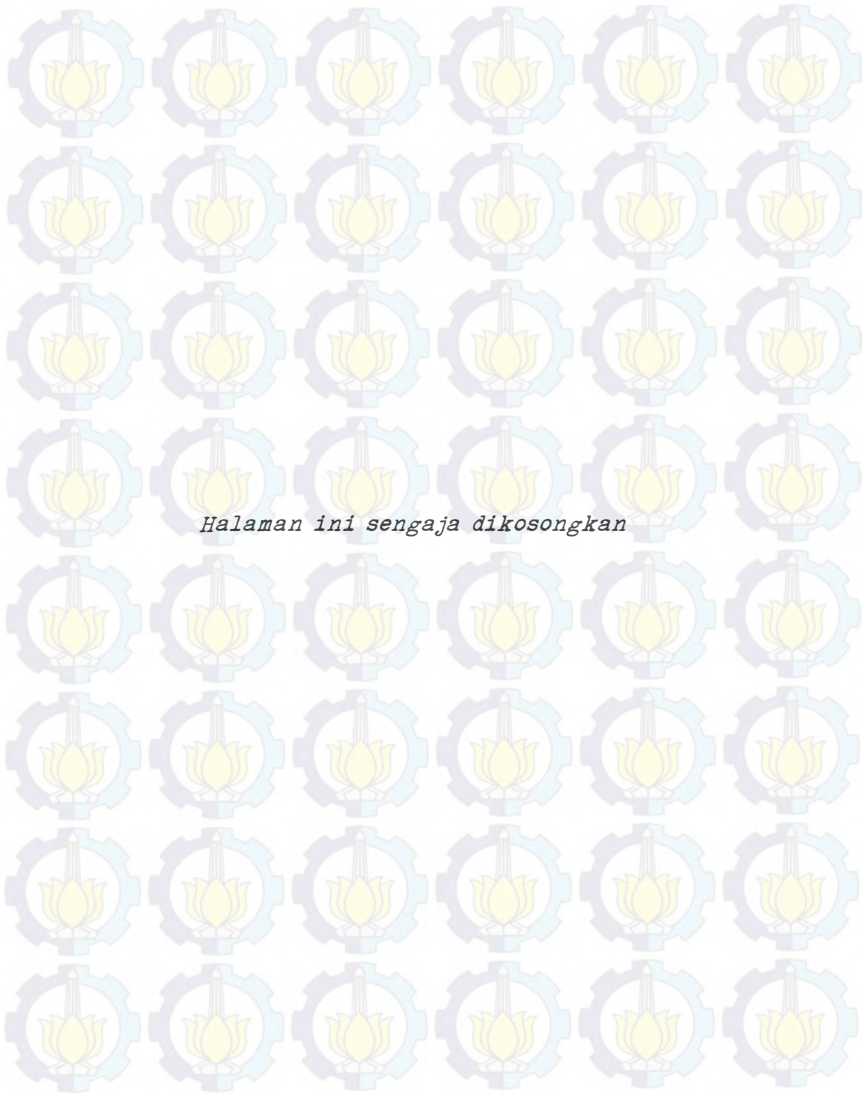
Pembimbing I : Dr. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Pembimbing II : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

ABSTRAK

Bahaya *arc flash* (busur api) yang terjadi pada sistem kelistrikan menimbulkan kerugian yang sangat besar. Insiden energi yang dilepaskan dapat merusak peralatan dan terutama dapat membahayakan pekerja yang bekerja di lingkungan tersebut. Sehingga diperlukan batas aman bagi pekerja, salah satunya dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 yang mengatur tentang analisa bahaya *arc flash* pada sistem tegangan rendah dan menengah. Besar kecilnya insiden energi *arc flash* dapat dihitung dengan menggunakan *bolted three-phase fault* ataupun *arc-clearing time* yang didapat dari waktu dimana arus gangguan saat itu terjadi akan menghasilkan nilai insiden energi *arc flash* yang lebih rendah. Hal ini memunculkan metode perhitungan modifikasi yang didasarkan pada perhitungan kontribusi arus hubung singkat dan waktu pemadaman busur api (*arc-clearing time*).

Dari hasil simulasi untuk analisa bahaya *arc flash* di sistem kelistrikan tegangan 6,3 kV PT. Semen Padang, Sumatera Barat, dengan menggunakan perhitungan metode modifikasi, diperoleh nilai insiden energi *arc flash* lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002.

Kata kunci : *Arc Flash*, Metode Modifikasi, Standar IEEE 1584-2002



Arc Flash Analysis On Medium Voltage Systems In PT. Semen Padang Using Modified Calculation Method

Jumaras Situngkir
2213 106 041

Advisor I : Dr. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

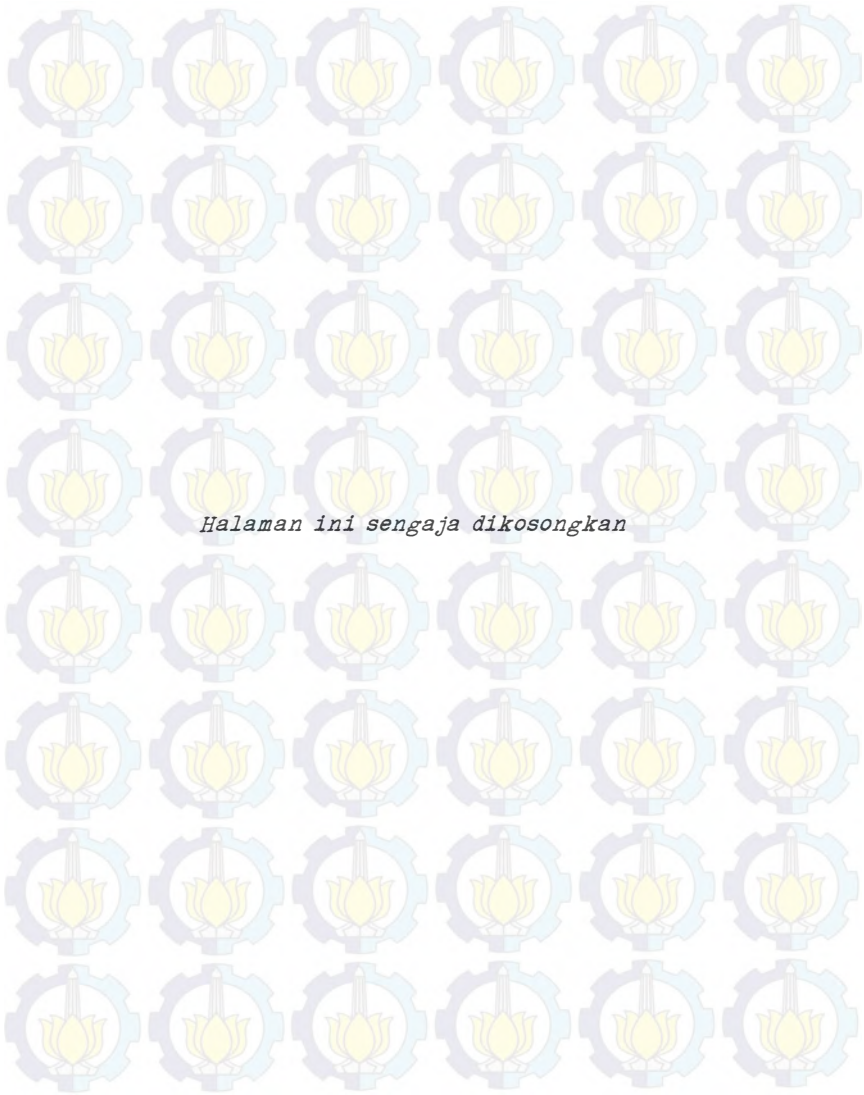
Advisor II : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

ABSTRACT

Arc Flash Hazard that occurs in electrical system will cause huge losses. Incident energy of arc flash will able to damage the equipment and endanger worker in these environment, especially. So we need the required safety limit for workers, one of them is using the standard of IEEE 1584–2002 that govern the arc flash hazard analysis at low and medium voltage systems. The size of arc flash can be calculated by using a three-phase bolted fault or arc-clearing time obtained from the time where the fault current and it happen will generate energy vale lower arc. This raises calculation method based on a modification of the calculation of short circuit current contribution and downtime arching (arc–clearing time) then the arc of energy produced is lower than the standard IEEE 1584–2002 calculation.

From the simulation results for arc flash hazard analysis on electrical system medium voltage 6,3 kV PT. Semen Padang, West Sumatera, using modified calculation method obtained that incident energy of arc flash lower than using standar IEEE 1584-2002

Keywords : *Arc Flash, Modified Calculation Method, Standard IEEE 1584-2002*



DAFTAR ISI

JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii

BAB I

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Relevansi	3
1.7 Sistematika Penulisan	4

BAB II

2.1 Definisi Busur Api Listrik	5
2.2 Rele Pengaman Arus Lebih Waktu <i>Invers</i>	6
2.3 Perhitungan Insiden Energi Busur <i>Arc Flash</i> Standar IEEE 1584-2002	8
2.4 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Dengan Metode Modifikasi	11
2.5 Batas Jarak Perlindungan <i>Arc Flash</i>	12
2.6 Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i>	14
2.7 Pengelompokan Kategori Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Dengan Perlengkapan Keselamatan Diri sesuai Standart NFPA 70E	15

BAB III

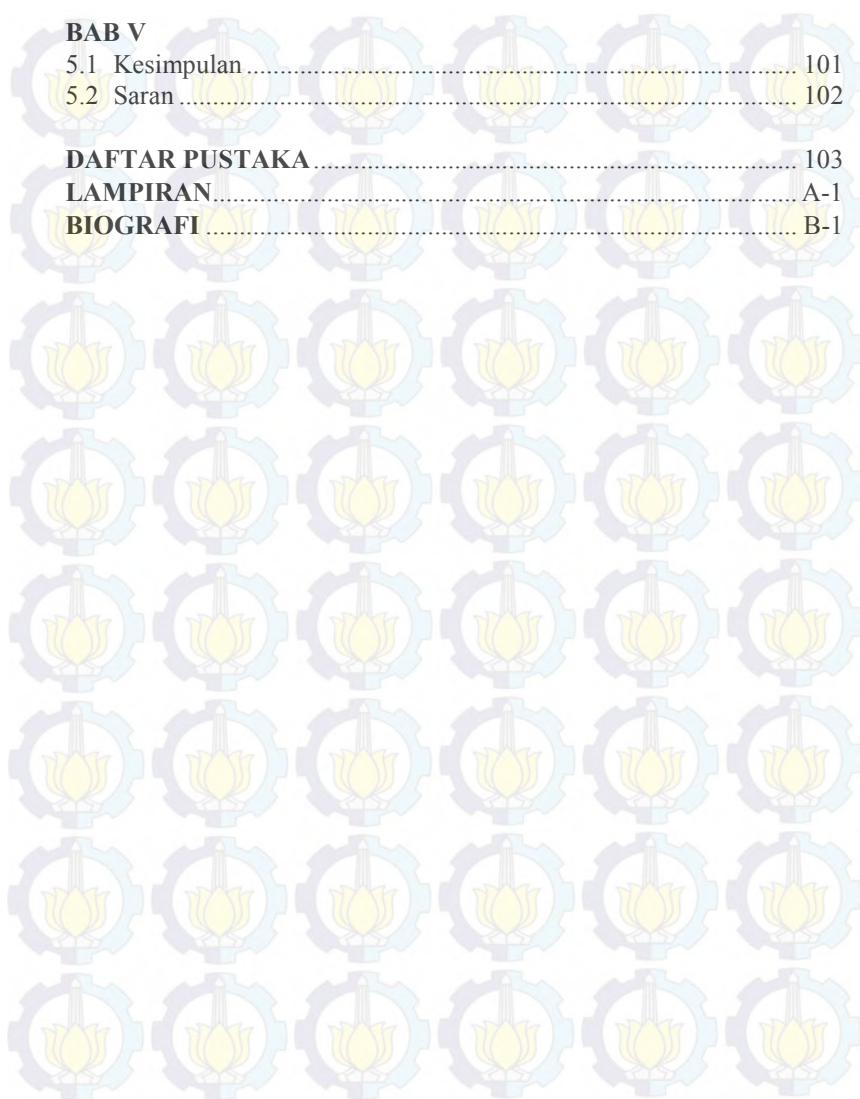
3.1 Sistem Kelistrikan PT. Semen Padang	17
---	----

3.2 Data Beban Kelistrikan PT. Semen Padang.....	20
--	----

BAB IV

4.1 Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Menggunakan Perangkat Lunak ETAP 12.6.0 (<i>Existing</i>)	25
4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih	26
4.2.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1	27
4.2.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 2	34
4.2.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 3	41
4.2.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 4	48
4.3 Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Pada Sistem <i>Resetting</i>	55
4.3.1 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Sistem <i>Resetting</i> Dengan Standar IEEE 1584-2002	56
4.3.2 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Sistem <i>Resetting</i> Dengan Metode Modifikasi.....	59
4.4 Hasil Simulasi Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Pada Sistem <i>Resetting</i> Dengan Penambahan Rele Diferensial.....	67
4.4.1 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Sistem <i>Resetting</i> Dengan Penambahan Rele Diferensial Sesuai Standar IEEE 1584-2002	68
4.4.2 Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Sistem <i>Resetting</i> Dengan Penambahan Rele Diferensial Menggunakan Metode Modifikasi	71
4.5 Perhitungan FPB Berdasarkan Hasil Perhitungan Insiden Energi <i>Arc Flash</i>	79
4.5.1 Perhitungan FPB Sesuai Standar IEEE 1584-2002 Sistem <i>Resetting</i> Dan Sistem <i>Resetting</i> Dengan Penambahan Rele Diferensial	80
4.5.2 Perhitungan FPB Dengan Metode Modifikasi Sistem <i>Resetting</i> Dan Sistem <i>Resetting</i> Dengan Penambahan Rele Diferensial	86
4.6 Perbandingan Besar Energi <i>Arc Flash</i> Sistem <i>Resetting</i> Dan Sistem <i>Resetting</i> Penambahan Rele Diferensial (Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi)	92
4.7 Perbandingan FPB Dan <i>Personal Protective Equipment</i>	

(PPE) Yang Harus Digunakan	94
BAB V	
5.1 Kesimpulan	101
5.2 Saran	102
DAFTAR PUSTAKA	103
LAMPIRAN	A-1
BIOGRAFI	B-1





DAFTAR GAMBAR

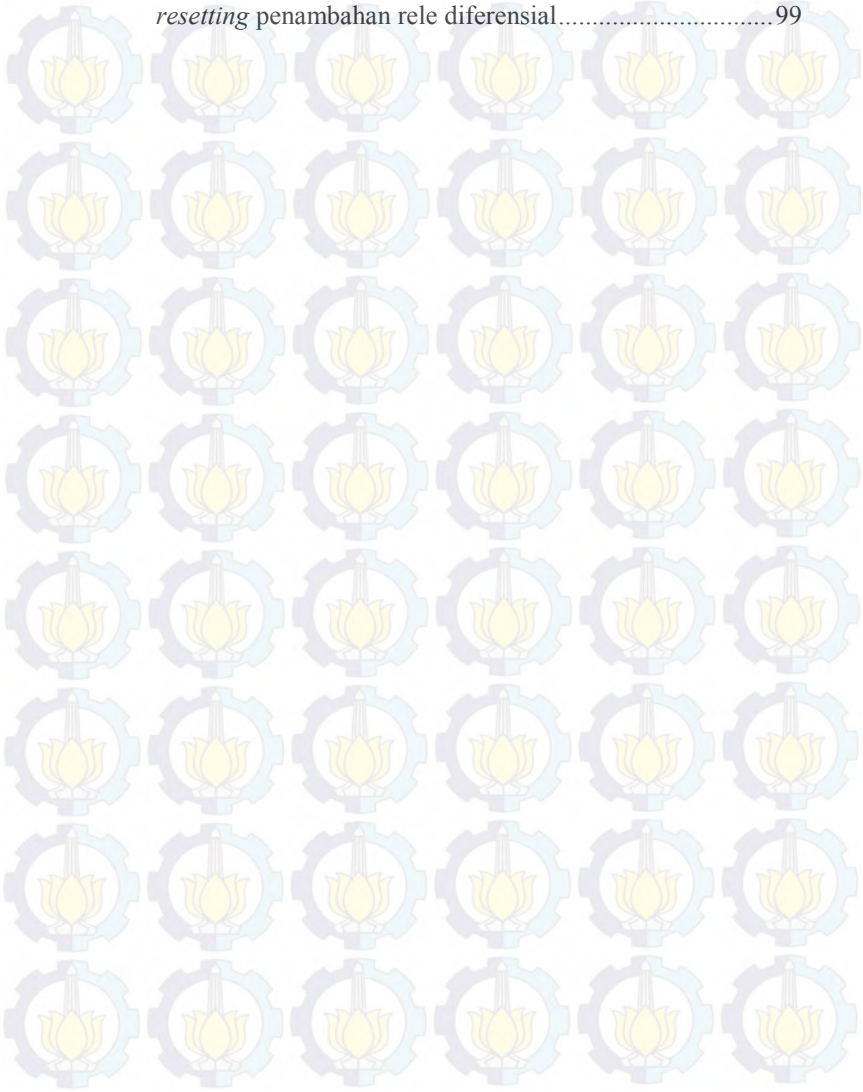
Gambar 2.1	Perbedaan <i>arcing fault</i> dengan <i>bolted fault</i>	5
Gambar 2.2	Efek yang ditimbulkan <i>arc fault</i>	6
Gambar 2.3	Skema kerja rele pengaman terhadap gangguan	6
Gambar 2.4	Karakteristik <i>standard inverse</i> , <i>very inverse</i> dan <i>extremely inverse</i>	7
Gambar 2.5	Pendekatan batasan yang mengatur jarak pekerja dengan peralatan bertegangan.....	14
Gambar 2.6	Klasifikasi alat perlindungan diri berdasarkan kategori	16
Gambar 2.7	Label peringatan bahaya <i>arc flash</i>	16
Gambar 3.1	Sistem kelistrikan PT. Semen Padang	17
Gambar 4.1	<i>Single Line Diagram</i> Tipikal 1	27
Gambar 4.2	Kurva koordinasi arus lebih Tipikal 1	28
Gambar 4.3	Plot kurva pengaman <i>resetting</i> Tipikal 1	33
Gambar 4.4	<i>Single Line Diagram</i> Tipikal 2	34
Gambar 4.5	Kurva koordinasi arus lebih Tipikal 2	35
Gambar 4.6	Plot kurva pengaman <i>resetting</i> Tipikal 2	40
Gambar 4.7	<i>Single Line Diagram</i> Tipikal 3	41
Gambar 4.8	Kurva koordinasi arus lebih Tipikal 3	42
Gambar 4.9	Plot kurva pengaman <i>resetting</i> Tipikal 3	47
Gambar 4.10	<i>Single Line Diagram</i> Tipikal 4	48
Gambar 4.11	Kurva koordinasi arus lebih Tipikal 4	49
Gambar 4.12	Plot kurva pengaman <i>resetting</i> Tipikal 4	54



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Koefisien <i>inverse time dial</i>	8
Tabel 2.2	Faktor untuk peralatan dan kelas tegangan.....	10
Tabel 2.3	<i>Typical Bus Gaps</i>	11
Tabel 2.4	<i>Typical working distance</i>	11
Tabel 2.5	Pengelompokan domain waktu perhitungan metode modifikasi.....	12
Tabel 2.6	Kategori perlengkapan pelindung diri	15
Tabel 3.1	Data Generator	18
Tabel 3.2	Data Transformator	18
Tabel 3.3	Data beban motor pada tegangan 6,3 kV	21
Tabel 3.4	Data beban motor pada tegangan 0,7 kV	22
Tabel 3.5	Data beban motor dan <i>lump load</i> pada tegangan 0,4 kV	23
Tabel 4.1	Hasil simulasi insiden energi <i>arc flash</i> pada sistem <i>existing</i> PT. Semen Padang	25
Tabel 4.2	Hasil simulasi insiden energi <i>arc flash</i> pada PT. Semen Padang setelah <i>resetting</i>	55
Tabel 4.3	Hasil simulasi insiden energi <i>arc flash</i> pada PT. Semen Padang sistem <i>resetting</i> dengan penambahan rele diferensial	67
Tabel 4.4	Perbandingan perhitungan besar insiden energi <i>arc flash</i> sesuai standar IEEE 1584-2002 dengan <i>modified</i> pada sistem <i>resetting</i>	92
Tabel 4.5	Perbandingan perhitungan besar insiden energi <i>arc flash</i> sesuai standar IEEE 1584-2002 dengan <i>modified</i> pada sistem <i>resetting</i> penambahan rele diferensial	93
Tabel 4.6	Perbandingan FPB berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi sistem <i>resetting</i>	94
Tabel 4.7	Perbandingan FPB berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi sistem <i>resetting</i> penambahan rele diferensial	95
Tabel 4.8	Jenis PPE berdasarkan kategori bahaya <i>arc flash</i> sesuai standar IEEE 1584-2002 setelah <i>resetting</i>	97
Tabel 4.9	Jenis PPE berdasarkan kategori bahaya <i>arc flash</i> berdasarkan perhitungan metode modifikasi sistem <i>resetting</i>	98

Tabel 4.10 Jenis PPE berdasarkan kategori bahaya *arc flash* berdasarkan perhitungan metode modifikasi sistem *resetting* penambahan rele diferensial..... 99



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Semen Padang (persero) merupakan salah satu anggota PT. Semen Indonesia yang berlokasi di Padang, Sumatera Barat. PT. Semen Padang saat ini memiliki pabrik dengan kapasitas produksi sebesar 6,9 juta ton per tahun. Untuk menunjang proses produksi PT. Semen Padang memiliki pabrik dengan total beban 90 MW. Dengan beban yang sangat besar tersebut, membuat tingkat bahaya sistem kelistrikannya semakin meningkat, dalam hal ini adalah adanya bahaya *arc flash* (*busur api*). Oleh sebab itu, demi menjaga keamanan dan keselamatan pekerja dari bahaya *arc flash*, perlu diketahui besarnya energi yang dihasilkan.

Besarnya insiden energi yang dihasilkan tergantung dari waktu kerja sistem pengaman akibat gangguan arus hubung singkat. Semakin cepat rele pengaman bekerja semakin kecil pula tingkat insiden energi *arc flash* yang ditimbulkan. Oleh karena itu, perlu dikaji atau dipelajari tingkat insiden energi *arc flash* yang ditimbulkan guna memberikan peringatan kepada para pekerja maupun orang disekitarnya, seperti alat pelindung diri (APD) yang harus dikenakan sebagai langkah pencegahan agar terhindar dari jatuhnya korban jiwa.

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002 yang berkaitan tentang masalah bahaya *arc flash*, analisa bahaya *arc flash* harus dilakukan dengan melakukan studi terhadap hubung singkat dan koordinasi proteksi. Studi hubung singkat diperlukan untuk mendapatkan nilai arus *bolted* gangguan tiga fasa. Sedangkan studi koordinasi proteksi diperlukan untuk menentukan waktu pada peralatan proteksi dalam mengisolasi ketika terjadi gangguan hubung singkat. Tetapi pada standar ini, tidak dipertimbangkan berkurangnya kontribusi arus hubung singkat pada tiap satuan waktu, dan waktu pemutusan masing-masing CB (*Circuit Breaker*) dalam melokalisasi gangguan. Oleh sebab itu akan digunakan metode modifikasi dengan mengkombinasikan perhitungan keduanya dalam menganalisa insiden energi *arc flash*.

Dengan hasil analisa insiden energi *arc flash* yang diperoleh, akan digunakan untuk menentukan batasan jarak dari titik yang berpotensi terjadinya *arc flash* terhadap pekerja. Selain itu juga akan ditentukan

kategori bahaya *arc flash* sekaligus jenis alat perlindungan diri sesuai standar NFPA 70E yang dipakai oleh pekerja.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan Masalah yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah :

1. Mensimulasikan dan menghitung besar insiden energi *arc flash* pada sistem kelistrikan tegangan 6,3 kV PT. Semen Padang sesuai standar IEEE 1584-2002.
2. Mensimulasikan dan menghitung besar insiden energi *arc flash* setelah dilakukan *resetting* koordinasi proteksi sesuai standar IEEE 1584-2002.
3. Menghitung besar insiden energi *arc flash* dengan metode modifikasi setelah *resetting*.
4. Membandingkan hasil dari besar insiden energi *arc flash* setelah *resetting*, antara standar IEEE 1584-2002 dengan perhitungan metode modifikasi.
5. Mendapatkan dan membandingkan jarak aman pekerja antara standar IEEE 1584-2002 dengan perhitungan metode modifikasi setelah *resetting*.
6. Mendapatkan kategori resiko yang ditimbulkan dari pengaruh insiden energi *arc flash* sesuai NFPA 70E serta perlengkapan keselamatan diri yang cocok untuk pekerja.

1.3 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, permasalahan dibatasi sebagai berikut :

1. Penentuan besar insiden energi *arc flash* pada masing-masing *switchgear* tegangan menengah (6,3 kV).
2. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0.

1.4 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Mendapatkan kategori level insiden energi *arc flash* sehingga dapat ditentukan jenis dari perlindungan diri yang harus digunakan.
2. Dapat menentukan jarak aman pekerja untuk meminimalisir resiko dampak kecelakaan akibat bahaya *arc flash*.

1.5 Metodologi

Pada Tugas Akhir ini metodologi yang digunakan penulis adalah :

1. Studi Literatur
Mempelajari literatur yang berkaitan tentang perhitungan insiden energi *arc flash* mengacu standar IEEE 1584-2002, dan perhitungan metode modifikasi.
2. Pengumpulan Data
Melakukan pengambilan data sistem kelistrikan di PT. Semen Padang, Sumatera Barat, yang nantinya diperlukan dalam studi analisa bahaya *arc flash* pada sistem tegangan menengah 6,3 kV.
3. Pemodelan sistem kelistrikan dan simulasi
Memodelkan data-data yang diperoleh kedalam perangkat lunak ETAP 12.6.0 dan kemudian melakukan simulasi untuk mendapatkan hasil data-data yang diinginkan.
4. Analisa Data
Menganalisa hasil data dari simulasi yang telah dilakukan. Data-data yang akan dianalisa antara lain data insiden energi *arc flash* dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan perhitungan metode modifikasi yang selanjutnya akan digunakan sebagai acuan penentuan jarak aman pekerja serta alat pelindung diri sesuai NFPA 70E.
5. Penulisan Buku Tugas Akhir
Pembuatan laporan tentang apa yang telah dikerjakan. Dalam hal ini, menunjukkan hasil besarnya insiden energi *arc flash* dengan standar IEEE 1584-2002 dan perhitungan metode modifikasi pada bus-bus tegangan menengah 6,3 kV di PT. Semen Padang, Sumatera Barat, kategori level insiden energi *arc flash*, serta jarak aman pekerja dari bahaya *arc flash*.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan informasi dan manfaat sebagai berikut :

1. Pembelajaran dan penyelesaian persoalan tentang insiden energi *arc flash* yang dihasilkan.
2. Pengelompokan klasifikasi besar insiden energi *arc flash* sesuai dengan perlengkapan pakaian keselamatan yang diharapkan dapat menghindari jatuhnya korban bagi para pekerja disekitarnya.

3. Menjadi referensi untuk penelitian berikutnya ketika dibutuhkan informasi tentang besarnya insiden energi *arc flash* dengan metode modifikasi perhitungan.

1.7 Sistematika Penulisan

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, relevansi, dan sistematika penulisan.

BAB II : ARC FLASH DAN METODE MODIFIKASI PERHITUNGAN

Bab ini membahas tentang definisi *arc flash*, salah satu faktor yang mempengaruhi besarnya insiden energi *arc flash*, perhitungan insiden energi *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002, perhitungan insiden energi *arc flash* dengan metode modifikasi, batas jarak perlindungan dari bahaya *arc flash*, serta pengelompokan kategori insiden energi *arc flash* dengan perlengkapan keselamatan diri sesuai NFPA 70E.

BAB III : SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN PADANG

Bab ini menjelaskan mengenai sistem kelistrikan yang ada di PT. Semen Padang, yaitu data transformator serta data beban.

BAB IV : SIMULASI DAN ANALISA *ARC FLASH* DI PT. SEMEN PADANG

Bab ini membahas mengenai analisa perhitungan energi busur api yang dihasilkan sesuai standar IEEE 1584-2002 maupun dengan metode modifikasi. Serta akan dilakukan perhitungan jarak aman pekerja dan jenis perlindungan apa yang harusnya digunakan berdasarkan kategori bahaya.

BAB V : PENUTUP

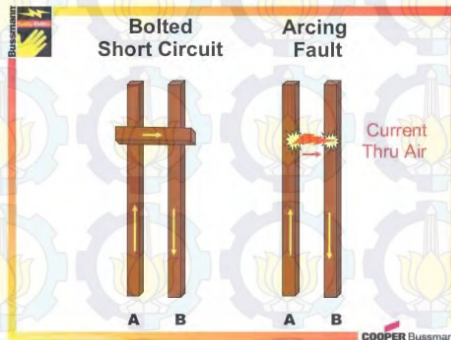
Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari keseluruhan pembahasan yang telah dilakukan dari Tugas Akhir.

BAB II

ARC FLASH DAN METODE MODIFIKASI

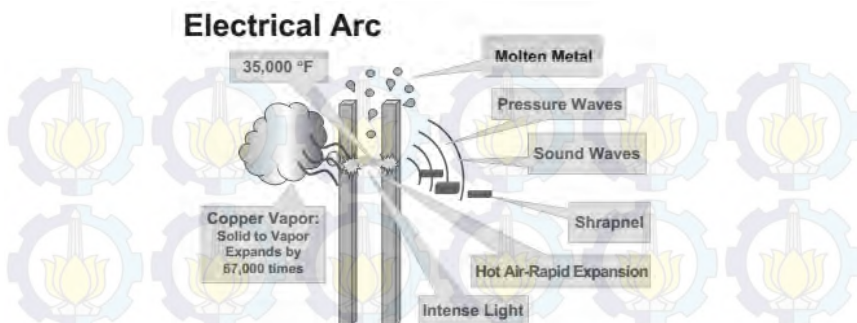
2.1 Definisi Busur Api Listrik

Terjadinya *arc flash* diakibatkan dari adanya *arcing-fault* maupun *bolted fault* [1]. *Arcing-fault* sendiri dapat didefinisikan sebagai busur api yang diakibatkan oleh arus gangguan yang mengalir melalui udara antara konduktor dengan konduktor atau konduktor dengan tanah. Arus tersebut menciptakan sebuah plasma busur listrik dan melepaskan sejumlah energi yang berbahaya. Sedangkan *bolted fault* terjadi akibat adanya perantara konduktor sebagai jalur arus gangguannya. Umumnya terjadinya *bolted fault* diakibatkan adanya kegagalan mekanik, kegagalan isolasi, debu dan korosi, serta kesalahan operator. Besar *arcing fault* biasanya lebih rendah dari *bolted fault*. Berdasarkan referensi [2], perbedaan antara *arcing fault* dengan *bolted fault* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Perbedaan *arcing fault* dengan *bolted fault*

Efek yang dihasilkan *arc flash* dapat berupa ledakan, radiasi panas, cahaya yang menyilaukan, dan tekanan yang sangat besar. Temperatur dari radiasi panas yang dihasilkan dapat mencapai sekitar 35.000°F, atau sekitar empat kali panas permukaan matahari. Temperatur yang tinggi juga merubah keadaan konduktor dari padat ke logam cair panas dan uap. Berdasarkan referensi [2] Gambar 2.2 menunjukkan efek yang ditimbulkan oleh *arc fault*.



Gambar 2.2 Efek yang ditimbulkan *arc fault*

Besarnya energi *arc flash* diakibatkan dari besarnya arus *bolted fault* atau arus hubung singkat maksimum, level tegangannya, jarak pekerja dengan titik *arc flash*, jarak antar konduktor, dan waktu peralatan proteksi dalam menghilangkan dan mengisolir gangguan.

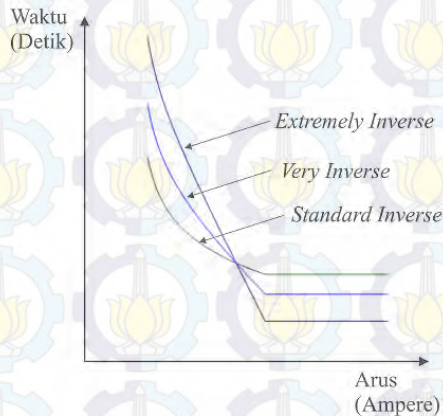
2.2 Rele Pengaman Arus Lebih Waktu *Invers*

Salah satu faktor yang menentukan besarnya energi *arc flash* adalah waktu peralatan proteksi dalam menghilangkan dan mengisolir gangguan. Peralatan-peralatan proteksi diharapkan memiliki kemampuan menghilangkan dan mengisolir gangguan dengan waktu yang cepat dan terkoordinasi antara satu sama lain dengan beroperasi secara selektif [5]. Hal ini dikarenakan titik gangguan dan tipe gangguan terjadi dengan sangat cepat. Tipe gangguan pada sistem tiga fasa adalah hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dua fasa ketanah, dan satu fasa ketanah. Ketika sebuah gangguan terjadi, arus mengalir menuju titik yang terganggu dan harus segera dilokalisir. Sehingga, selain meminimalisir terjadinya *arc flash*, juga untuk mempertahankan kontinuitas suplai daya listrik. Dasar peralatan proteksi adalah rele pengaman, pemutus (*circuit breaker*), dan *fuse*. Berdasarkan referensi [6], skema kerja rele pengaman dapat dilihat pada gambar Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema kerja rele pengaman terhadap gangguan

Salah satu rele pengaman yang sering digunakan pada sistem tiga fasa adalah rele arus lebih waktu *invers*. Rele ini akan bekerja dengan waktu kerja yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*inverse time*). Semakin besar arus gangguan maka semakin cepat waktu bekerjanya, begitu sebaliknya. Dalam karakteristik kurva *invers*, yang paling umum digunakan tiga jenis kurva, yaitu kurva *inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Yang membedakan karakteristik mereka adalah waktu bekerjanya, dimana *extremely inverse* beroperasi lebih cepat dari *very inverse*, dan *very inverse* lebih cepat dari *inverse* [5].



Gambar 2.4 Karakteristik *standard inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse*

Untuk *setting* rele arus lebih *invers*, terdapat dua macam setelan, yaitu setelan *pickup* dan setelan *time dial*. Setelan *pickup* disini merupakan setelan untuk membatasi kelebihan nilai arus beban maksimum, menentukannya yaitu dengan cara pemilihan nilai tap pada rele. Adapun persamaan 2.1 berdasarkan referensi [6] untuk menentukan besarnya nilai tap yang akan digunakan sebagai berikut :

$$Tap = \frac{I_{SET}}{N_{CT}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana I_{SET} adalah arus *pickup* dalam ampere, sedangkan N_{CT} adalah rasio belitan pada trafo arus (CT). Menurut referensi [6], batas nilai *setting* I_{SET} adalah $1,05 I_{FLA} < I_{SET} < 1,4 I_{FLA}$, dimana I_{FLA} adalah arus beban maksimum peralatan.

Sedangkan untuk setelan *time dial* pada rele arus lebih *invers*, digunakan untuk menentukan waktu operasi rele. Penentuan *time dial* dari masing-masing kurva karakteristik rele arus lebih *invers* digunakan persamaan berikut:

$$t = \frac{K \times Td}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^\alpha - 1 \right]} \quad (2.2)$$

dimana :

- t waktu operasi (detik)
- Td time dial
- I nilai arus (Ampere)
- I_{pickup} arus *pickup* (Ampere)
- K koefisien *invers* 1 (Lihat Tabel 2.1)
- A koefisien *invers* 2 (Lihat Tabel 2.1)
- B koefisien *invers* 3 (Lihat Tabel 2.1)

Tabel 2.1 Koefisien *inverse time dial*

Tipe Kurva	Koefisien		
	K	A	B
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02	2,970
<i>Very Inverse</i>	13,50	1,00	1,500
<i>Extremely Inverse</i>	80,00	2,00	0,808

2.3 Perhitungan Insiden Energi Busur Arc Flash Standar IEEE 1584-2002

Perhitungan insiden energi *arc flash* sesuai dengan standar IEEE 1584-2002 diperoleh berdasarkan arus hubung singkat pada kondisi tertentu dengan level tegangan rendah maupun menengah. Perbedaan level tegangan ini akan mempengaruhi perhitungan menentukan insiden energi *arc flash* [3].

Perhitungan standar energi *arc flash* pada sistem tegangan menengah dapat diperoleh dengan mencari nilai arus *arcing* terlebih dahulu. Berdasarkan standar IEEE 1584-2002 nilai arus *arcing* diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dari persamaan (2.1) dapat ditulis kembali dengan persamaan sebagai berikut :

$$\lg I_a - 0,983 \lg I_{bf} = 0,00402$$

$$\lg I_a - \lg I_{bf}^{0,983} = 0,00402$$

$$\lg \left(\frac{I_a}{I_{bf}^{0,983}} \right) = 0,00402$$

$$\frac{I_a}{I_{bf}^{0,983}} = 10^{0,00402}$$

$$\frac{I_a}{I_{bf}^{0,983}} = 1,00929$$

$$I_a = 1,00929 I_{bf}^{0,983} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana,

\lg $\log 10$

I_a arus *arcing* (kA)

I_{bf} arus *bolted* gangguan tiga fasa simetris RMS (kA)

Dari perhitungan nilai arus *arcing* akan diperoleh nilai insiden energi normalisasi dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

atau dapat ditulis dengan persamaan,

$$E_n = I_a^{1,081} 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011 G)} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana,

E_n insiden energi normalisasi (cal/cm²)

K_1 -0,792 untuk konfigurasi peralatan terbuka

-0,555 untuk konfigurasi peralatan tertutup (dengan *box*)

K_2 0 untuk sistem yang tidak ditanahkan atau sistem dengan pentanahan tahanan tinggi

-0.113 untuk sistem yang ditanahkan

G jarak antar konduktor (*gap*) (mm)

Adanya variabel waktu, (x) faktor dan jarak antara peralatan dengan pekerja maka akan menghasilkan jumlah energi yang dilepaskan ke udara. Besarnya insiden energi dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$E = 4,184 Cf E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610}{D} \right)^x \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2), (2.3) dan (2.4), maka persamaan besar insiden energi untuk tegangan menengah dapat disederhanakan menjadi persamaan (2.5)

$$E = Cf \left(1,00929 Ibf^{0,983} \right)^{,081} 10^{(K_1+K_2+0,0011G)} \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610}{D} \right)^x \dots (2.5)$$

dimana,

E insiden energi (J/cm²)

Cf faktor perhitungan bernilai 1.0 untuk tegangan diatas 1 kV
faktor perhitungan bernilai 1.5 untuk tegangan dibawah 1 kV

t waktu *arcing* (detik)

D jarak dari titik *arc flash* ke pekerja (mm)

x eksponen jarak, dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Faktor untuk peralatan dan kelas tegangan

Sistem Tegangan (kV)	Tipe konfigurasi peralatan	Tipikal gap antar konduktor (mm)	Eksponen jarak (x)
0,208-1	<i>Open air</i>	10-40	2,000
	<i>Switchgear</i>	32	1,473
	<i>MCC and panels</i>	25	1,641
	<i>Cable</i>	13	2,000

Tabel 2.2 Faktor untuk peralatan dan kelas tegangan (lanjutan)

Sistem Tegangan (kV)	Tipe konfigurasi peralatan	Tipikal gap antar konduktor (mm)	Eksponen jarak (x)
>1-5	<i>Open air</i>	13-102	2,000
	<i>Switchgear</i>	13-102	0,973
	<i>Cable</i>	13	2,000
>5-15	<i>Open air</i>	13-153	2,000
	<i>Switchgear</i>	153	0,973
	<i>Cable</i>	13	2,000

Untuk jarak antar konduktor dan jarak pekerja dari setiap konfigurasi masing-masing kelas peralatan sesuai dengan standar IEEE 1584-2002 dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4.

Tabel 2.3 *Typical Bus Gaps*

<i>Classes of equipment</i>	<i>Typical bus gaps (mm)</i>
15 kV <i>Switchgear</i>	152
5 kV <i>Switchgear</i>	104
<i>Low voltage switchgear</i>	32
<i>Low voltage MCCs and panelboard</i>	25
<i>Cable</i>	13
<i>Other</i>	<i>Not required</i>

Tabel 2.4 *Typical working distance*

<i>Classes of equipment</i>	<i>Typical working distance (mm)</i>
15 kV <i>Switchgear</i>	910
5 kV <i>Switchgear</i>	910
<i>Low voltage switchgear</i>	610
<i>Low voltage MCCs and panelboard</i>	455
<i>Cable</i>	455
<i>Other</i>	<i>To be determined in field</i>

2.4 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Dengan Metode Modifikasi

Perhitungan insiden energi dengan metode modifikasi merupakan pengembangan dari perhitungan standar IEEE 1584-2002. Akan tetapi

dalam metode modifikasi dipertimbangkan berkurangnya arus gangguan tiga fasa dan juga waktu pemutusan masing-masing *circuit breaker* dalam menghilangkan gangguan (*Arc Clearing Time*) [1].

Untuk perhitungannya, digunakan pengelompokan domain waktu berdasarkan konstanta waktu tipikal mesin berputar untuk fase peralihan hubung singkat tertentu. Adapun domain waktu tersebut seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Pengelompokan domain waktu perhitungan metode modifikasi

Domain Waktu	Fase Peralihan	Komponen yang Menyumbang Arus Hubung Singkat
0 – 0.035	<i>Subtransient</i>	<i>Utility</i> , Mesin Sinkron, Motor Induksi > 1000 HP, Motor Induksi 50 – 1000 HP, Motor Induksi < 50 HP
0.035 – 0.08	<i>Transient</i>	<i>Utility</i> , Mesin Sinkron, Motor Induksi > 1000 HP, Motor Induksi 50 – 1000 HP
0.08 – 0.8	<i>Transient</i>	<i>Utility</i> , Mesin Sinkron, Motor Induksi > 1000 HP
0.8 – t (<i>Arc Clearing Time</i>)	<i>Steady State</i>	<i>Utility</i> , Generator Sinkron

Sedangkan perhitungan insiden energi total merupakan penjumlahan dari insiden energi tiap domain waktu yang bisa dilihat dari persamaan berikut :

$$E_{total} = E_{0,035\text{sec}} + E_{0,08\text{sec}} + E_{0,8\text{sec}} + E_{t\text{sec}} \dots\dots\dots (2.6)$$

2.5 Batas Jarak Perlindungan *Arc Flash*

Batas jarak perlindungan terhadap titik *arc flash* disebut *flash protection boundary*. Ini merupakan batas jarak tertentu dengan konduktor aktif yang memungkinkan seseorang terpapar bahaya *arc flash* (*Arc-Flash Hazard*). Batasan jarak ini dapat dikategorikan setelah nilai insiden energi *arc flash* diketahui.

National Fire Protection Association (NFPA) telah mengembangkan sebuah pendekatan dalam menentukan batasan-batasan khusus yang dirancang untuk melindungi pekerja saat bekerja pada atau dekat peralatan yang bertegangan [4]. Ada 4 batasan perlindungan yang ditetapkan, yaitu :

1. *Flash Protection Boundary*

Ketika sebuah bahaya *arc flash* terjadi, seorang pekerja yang berada pada batasan ini masih dapat terkena dampak luka bakar tingkat kedua jika dia tidak menggunakan alat perlindungan diri ketika tingkat insiden energinya 5 J/cm^2 (1.2 cal/cm^2).

2. *Limited Approach Boundary*

Sebuah pendekatan terhadap batasan jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan atau bagian rangkaian yang mana terdapat bahaya sengatan listrik.

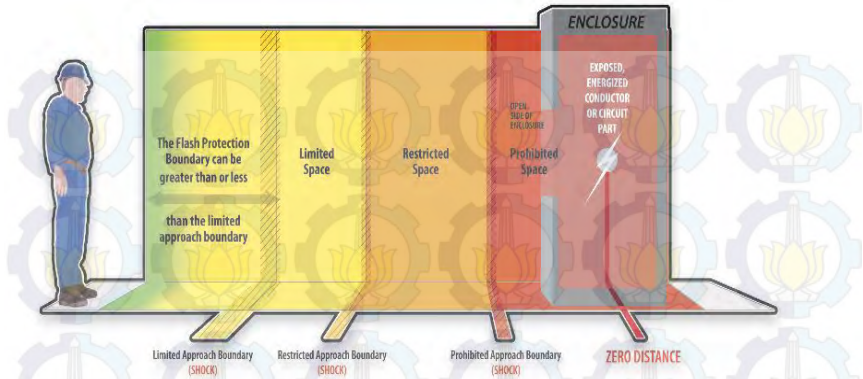
3. *Restricted Approach Boundary*

Sebuah pendekatan terhadap batasan jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dimana ada peningkatan risiko terkena sengatan listrik, karena busur api dikombinasikan dengan gerakan yang tidak disengaja.

4. *Prohibited Approach Boundary*

Sebuah pendekatan terhadap batasan jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dimana pekerja dianggap memiliki kontak langsung dengan konduktor listrik.

Dari penjelasan diatas, perbedaan batas-batas area perlindungan pekerja terhadap peralatan bertegangan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pendekatan batasan yang mengatur jarak pekerja dengan peralatan bertegangan

2.6 Perhitungan *Flash Protection Boundary*

Dalam menentukan batasan perlindungan *arc flash*, diperlukan suatu perhitungan agar mengetahui batasan aman bagi pekerja terhadap peralatan bertegangan. Berikut persamaannya sesuai standar IEEE 1584-2002 [1].

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana:

D_B = jarak batasan dari titik *arcing* (mm)

t = waktu (detik)

E_B = insiden energi dalam J/cm² pada jarak batasan. Dapat di-set pada nilai 5.0 J/cm²

atau dapat juga dihitung dengan menggunakan metode Lee [3]

$$D_B = \sqrt{2,412 \times 10^6 V I_b f \left(\frac{t}{E_n} \right)} \dots\dots\dots (2.8)$$

2.7 Pengelompokkan Kategori Insiden Energi Arc Flash Dengan Perlengkapan Keselamatan Diri sesuai Standart NFPA 70E

Kategori bahaya atau resiko *arc flash* ditentukan menggunakan nomor yang mewakili tingkat bahaya berdasarkan insiden energinya. Kategori 0 merepresentasikan adanya bahaya sedikit atau bahkan tidak ada. Sedangkan kategori 4 adalah yang paling berbahaya. Tabel 2.6 menunjukkan klasifikasi resiko yang mengacu pada standar NFPA 70E berdasarkan referensi [4]. Para pekerja harus mempersiapkan diri dengan peralatan maupun perlengkapan (*Personal Protective Equipment*) sesuai dengan kategori resiko sebelum memulai pekerjaan atau inspeksi di sekitar area yang bertegangan. Dokumentasi dan label peringatan juga diperlukan.

Tabel 2.6 Kategori perlengkapan pelindung diri

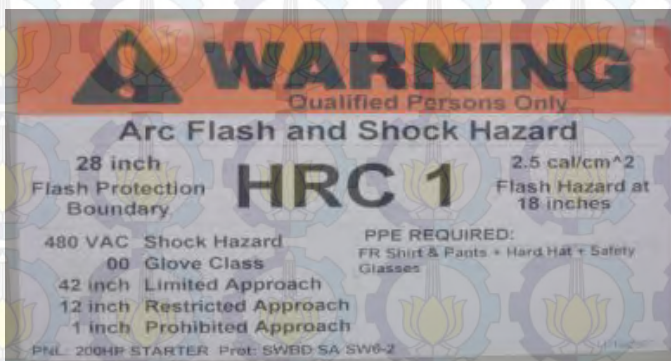
Kategori	Level Energi (Cal/cm ²)	PPE – PPC yang Dibutuhkan
0	< 2	Bahan yang tidak meleleh, mudah terbakar (Contoh : kain katun, wol, sutra, atau campuran bahan – bahan tersebut)
1	2 – 4	Pakaian dan celana yang tahan api
2	4 – 8	Pakaian dalam dengan kain katun, serta pakaian luar dan celana yang tahan api
3	8 – 25	Pakaian dalam kain katun ditambah baju dan celana yang tahan api ditambah pakaian tahan api yang mencakup seluruh tubuh
4	25 – 40	Pakaian dalam katun ditambah baju dan celana tahan api ditambah mantel dan celana tahan api <i>double layer</i>

Dari tabel diatas, bentuk nyata pakaian pelindung berdasarkan pengelompokan alat pelindung diri yang disesuaikan dengan kategori PPE, dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Klasifikasi alat pelindungan diri berdasarkan kategori.

Selain pakaian pelindung, diperlukan label peringatan yang memuat informasi meliputi nilai *arc flash*, jarak aman pekerja, serta pakaian kerja yang digunakan pada area tertentu. Sehingga diharapkan tingkat kelalaian pekerja dapat diminimalisir. Contoh label pekerja dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Label peringatan bahaya *arc flash*

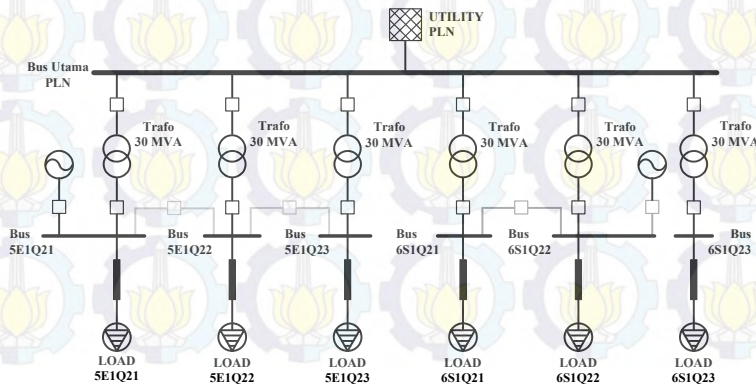
BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN PADANG

PT. Semen Padang merupakan salah satu perusahaan semen yang dinasionalisasi oleh Pemerintah Republik Indonesia dari Pemerintah Belanda pada tahun 1958. Saat ini, PT. Semen Padang merupakan bagian dari PT. Semen Indonesia dengan kapasitas produksi 6.000.000 ton per tahun. Dengan kapasitas produksinya yang sangat besar, diperlukan energi listrik sebesar 94,98 MW yang terdiri dari 1,2 MW digunakan untuk kegiatan non pabrik dan 93,6 MW untuk operasional pabrik, baik dalam penambangan, pengolahan, ataupun riset. Perusahaan ini berada di Indarung, 15 km dari kota Padang, Sumatera Barat.

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Semen Padang

Sistem kelistrikan pada PT. Semen Padang dirancang guna memenuhi operasional perusahaan yang memanfaatkan energi listrik. Energi listrik ini digunakan untuk menggerakkan berbagai mesin serta operasional lainnya. Oleh sebab itu, diperlukan sistem kelistrikan yang handal agar kontinuitas operasional perusahaan tetap terjaga. Salah satu faktor yang diperhatikan guna menjaga kontinuitas pelayanan listrik yaitu meminimalisir dampak buruk akibat adanya gangguan hubung singkat. Gangguan tersebut akan menimbulkan *arc flash* (busur api). Oleh sebab itu diperlukan analisa terhadap sistem kelistrikan di perusahaan ini. Adapun *Single Line Diagram* sistem kelistrikan pada PT. Semen Padang yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem kelistrikan PT. Semen Padang

Sumber energi listrik utama pada PT. Semen Padang disuplai oleh PLN. Guna penghematan energi serta meningkatkan kemandirian penyediaan energi listrik, PT Semen Padang juga memiliki pembangkit sendiri dengan kapasitas total 16,5 MW. Data pembangkit yang dimiliki oleh PT. Semen Padang dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Data Generator

No.	ID Generator	MVA	MW	kV	PF (%)
1	WHRPG	10	8,5	6,3	90
2	PLTD	10	8	6,3	90

Sumber yang disuplai oleh PLN terhubung dengan saluran transmisi 150 kV. Sehingga diperlukan transformator *step down* guna menurunkan tegangan ke 6,3 kV ataupun tegangan yang lebih rendah 0,7 kV dan 0,4 kV. Data transformator meliputi rating tegangan dan kapasitas daya yang dimiliki PT. Semen Padang dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Data Transformator

No.	ID Trafo	Tegangan (kV)	Kapasitas Daya
1	Trafo 1 Ind.V	150/6,3	30 MVA
2	Trafo 1 Ind.VI	150/6,3	30 MVA
3	Trafo 2 Ind.V	150/6,3	30 MVA
4	Trafo 2 Ind.VI	150/6,3	30 MVA
5	Trafo 3 Ind.V	150/6,3	30 MVA
6	Trafo 3 Ind.VI	150/6,3	30 MVA
7	TR S CM	6,3/0,4	2000 KVA
8	TR01.TR02.268TBG	6,3/20	10 MVA
9	TR02.268TBG	20/6,3	10 MVA
10	TR.5R1DIST-RMD	6,3/0,4	1000 KVA
11	TR.5R2DIST-RM	6,3/0,4	1000 KVA
12	TR.5TB1DIST01-CRS	6,3/0,4	1600 KVA
13	TR.5TB1DIST02-TBG	6,3/0,4	2000 KVA
14	TR.5TB1DIST03-SUB	6,3/0,4	1600 KVA
15	TR.5W1DIST01-CCB	6,3/0,4	1000 KVA
16	TR.5W1DIST02-EMS	6,3/0,4	1600 KVA
17	TR.5W2DIST01-CD&CT	6,3/0,4	1600 KVA

Tabel 3.2 Data Transformator (lanjutan)

No.	ID Trafo	Tegangan (kV)	Kapasitas Daya
18	TR.5W2DIST02-CD&CT	6,3/0,4	2000 KVA
19	TR.5W2DIST03-CD&CT	6,3/0,4	2000 KVA
20	TR.5ZS1DIST- CM&TRANS	6,30,4	2000 KVA
21	TR.5ZS1M03-RP	6,3/0,7	1250 KVA
22	TR.5ZS2DIST- CM&TRANS	6,3/0,4	2000 KVA
23	TR.5ZS2M03-RP	6,3/0,7	1250 KVA
24	TR.21DIST01-KF	6,3/0,4	1600 KVA
25	TR.21DIST02-DT	6,3/0,4	1600 KVA
26	TR.21DIST03-COMST	6,3/0,4	1600 KVA
27	TR.21DIST04-ACC	6,3/0,4	1000 KVA
28	TR.24DIST01-RMT	6,3/0,4	1600 KVA
29	TR.24DIST02-RMT	6,3/0,4	2000 KVA
30	TR.24DIST03-MRH	6,3/0,4	1000 KVA
31	TR.24DIST04-LSTS	6,3/0,4	1000 KVA
32	TR.24DIST05-CC&CI	6,3/0,4	1000 KVA
33	TR.32DIST01-KD	6,3/0,4	2000 KVA
34	TR.32DIST02-CMMD	6,3/0,4	1600 KVA
35	TR.32DIST03-CEF	6,3/0,4	2000 KVA
36	TR.33DIST01-LM	6,3/0,4	1500 KVA
37	TR.33DIST02-LM	6,3/0,4	1500 KVA
38	TR.33DIST03-LM	6,3/0,4	1500 KVA
39	TR.158DIST01-SILICA	6,3/0,4	2000 KVA
40	TR.158DIST02-LBT	6,3/0,4	2000 KVA
41	TR.268DIST01-MOSHER	6,3/0,4	2000 KVA
42	TR.268DIST02-MOSHER	6,3/0,4	2000 KVA
43	TR.268DIST03-LSC	6,3/0,4	2000 KVA
44	TR.348RDDIST-RM	6,3/0,4	1600 KVA
45	TR.348RFM02- CLASSIFIER	6,3/0,7	800 KVA
46	TR.428DIST01-KF	6,3/0,4	2000 KVA
47	TR.428DIST02-DT	6,3/0,4	2000 KVA
48	TR.448DIST-COOLER	6,3/0,4	2000 KVA

Tabel 3.2 Data Transformator (lanjutan)

No.	ID Trafo	Tegangan (kV)	Kapasitas Daya
49	TR.468DIST-CM	6,3/0,4	1600 KVA
50	TR.468M01-BOOSTERF	6,3/0,7	630 KVA
51	TR.548DIST01-CM	6,3/0,4	2000 KVA
52	TR.548DIST02-ADITIF	6,3/0,4	1600 KVA
53	TR.548DIST03-KLINKER	6,3/0,4	2000 KVA
54	TR.548M03-CLASSIFIER	6,3/0,7	500 KVA
55	TR.731DIST-CCR	6,3/0,4	2000 KVA
56	TR.Cemen Silo	6,3/0,4	1600 KVA
57	TR.Extraction	6,3/0,4	1600 KVA
58	TR.PPI	6,3/0,4	2000 KVA
59	TR.WHRPG	6,3/0,4	1600 KVA
60	TR01.428M01-BFF	6,3/6,3/6,3	1725 KVA
61	TR01.548M02-CMF	6,3/6,3/6,3	2100 KVA
62	TR01.731M03-IDF	6,3/6,3/6,3	1725 KVA
63	TR01.731M04-IDF	6,3/6,3/6,3	1725 KVA
64	TR02.428M01-BFF	6,3/6,3/6,3	1725 KVA
65	TR02.548M02-CMF	6,3/6,3/6,3	2100 KVA
66	TR02.731M03-IDF	6,3/6,3/6,3	1725 KVA
67	TR02.731M04-IDF	6,3/6,3/6,3	1725 KVA
68	TR.5W1M-KD	6,3/0,4/0,4	1500 KVA
69	TR.32M-KD	6,3/0,4/0,4	1500 KVA
70	TR.448M01-UNDERGATE	6,3/0,7/0,7	5300 KVA
71	TR.731M-KD	6,3/0,7/0,7	1500 KVA

3.2 Data Beban Kelistrikan PT. Semen Padang

Beban yang dimiliki PT. Semen Padang sangat beragam yang bergantung dengan fungsinya. Oleh sebab itu, daya listrik yang dibutuhkan masing-masing bebanpun berbeda-beda. Beban-beban tersebut dapat berupa penggerak, pemanas, pendingin, perangkat elektronik ataupun penerangan.

Kegiatan produksi PT. Semen Padang dari tahap penambangan bahan mentah (*quarry*), tahap pengolahan, hingga pengepakan menggunakan mesin penggerak, sebagai contoh konveyor ataupun mesin penggiling.

Mesin penggerak yang banyak digunakan oleh PT. Semen Padang yaitu motor induksi tiga fasa.

Beban motor yang ada di PT.Semen Padang terdiri atas beban pada level tegangan 6,3 kV, tegangan 0,7 kV, dan tegangan 0,4 kV. Data beban motor tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.3, Tabel 3.4, dan Tabel 3.5.

Tabel 3.3 Data beban motor pada tegangan 6,3 kV

No.	ID Unit	Rating (KW)	FLA
1	5K1M01-CMF	750	79,51
2	5K1M02-CMD	750	79,51
3	5R1M01-RMF	2900	303,33
4	5R1M02-RM	2900	303,33
5	5R2M01-RMF	2900	303,33
6	5R2M02-RMD	2900	303,33
7	5W2M01-CEPF	1250	131,84
8	5ZS1M01-CMF	520	55,33
9	5ZS1M02-CMD	6140	637,46
10	5ZS2M01-CMF	520	55,33
11	5ZS2M02-CMD	6140	637,46
12	21M01-KF	2400	251,49
13	21M02-KF	2400	251,49
14	21M03-EPF	1250	131,84
15	32M01-MDF	2520	263,95
16	32M02-ESPF	720	76,37
17	32M05-CMMD	425	45,31
18	32M06-CMMD	500	53,23
19	32M07-CEF	600	63,75
20	33M01-ESPF	650	69,01
21	33M02-PF	1150	121,40
22	33M03-CMMD	800	84,75
23	33M04-CM	800	84,75

Tabel 3.3 Data beban motor pada tegangan 6,3 kV (lanjutan)

No.	ID Unit	Rating (KW)	FLA
24	268M01-MOSHER	266	28,68
25	268M02-MOSHER	265	28,57
26	268M03-LSC	1179	127,11
27	268M04-LSC	1179	127,11
28	268M05-LSC	1179	127,11
29	348RDM01-RMD	7830	824,79
30	348RFM01-RMF	7883	830,37
31	428M01-BFF	1801	173,74
32	468M02-CMD	760	80,06
33	468M03-CMF	1360	143,26
34	548M01-CMD	4480	471,91
35	548M02-CMF	2344	226,12
36	731M03-IDF	1783	172
37	731M04-IDF	1783	172

Tabel 3.4 Data beban motor pada tegangan 0,7 kV

No.	ID Unit	Rating (KW)	FLA
1	5ZS1M03-RP	900	857,10
2	5ZS2M03-RP	900	857,10
3	348RFM02-CLASSIFIER	292	253,51
4	448M01-UNDERGATE	1856	1611,37
5	468M01-BOOSTERF	292	253,51
6	548M03-CLASSIFIER	174	151,07
7	731M01-KD	208	180,59
8	731M02-KD	208	180,59

Tabel 3.5 Data beban motor dan *lump load* pada tegangan 0,4 kV

No.	ID Unit	Rating (KW)	FLA
1	5W1M01-KD	600	1004,04
2	5W1M02-KD	600	1004,04
3	32M03-KD	650	1086,89
4	32M04-KD	650	1086,89
5	5R1DIST-RMD	700	1010,36
6	5R2DIST-RM	600	866,03
7	5TB1DIST01-CRS	771	1112,84
8	5TB1DIST02-TBG	650	938,19
9	5TB1DIST03-SUB	900	1299,04
10	5W1DIST01-CCB	500	721,69
11	5W1DIST02-EMS	1165	1681,53
12	5W2DIST01-CD&CT	900	1299,04
13	5W2DIST02-CD&CT	1365	1970,21
14	5W2DIST03-CD&CT	1365	1970,21
15	5ZS1DIST-CM&TRANS	1365	1970,21
16	5ZS2DIST-CM&TRANS	1165	1681,53
17	21DIST01-KF	1165	1681,53
18	21DIST02-DT	1196	1726,28
19	21DIST03-COMST	1018	1469,36
20	21DIST04-ACC	700	1010,36
21	24DIST01-RMT	1096	1581,94
22	24DIST02-RMT	1365	1970,21
23	24DIST03-MRH	600	866,03
24	24DIST04-LSTS	600	866,03
25	24DIST05-CC&CI	498	718,80
26	32DIST01-KD	1296	1870,62

Tabel 3.5 Data beban motor dan *lump load* pada tegangan 0,4 kV (lanjutan)

No.	ID Unit	Rating (KW)	FLA
27	32DIST02-CMMD	900	1299,04
28	32DIST03-CEF	1165	1681,53
29	33DIST01-LM	122	176,09
30	33DIST02-LM	976	1408,74
31	33DIST03-LM	801	1156,14
32	158DIST01-SILICA	1496	2159,29
33	158DIST02-LBT	1365	1970,21
34	268DIST01-MOSHER	122	176,09
35	268DIST02-MOSHER	976	1408,74
36	268DIST03-LSC	801	1156,14
37	348RDDIST-RM	1532	2211,25
38	428DIST01-KF	1345	1941,34
39	428DIST02-DT	1566	2260,33
40	448DIST-COOLER	1492	2153,52
41	468DIST-CM	1018	1469,36
42	548DIST01-CM	2001	2888,20
43	548DIST02-ADITIF	1171	1690,19
44	548DIST03-KLINKER	498	718,80
45	731DIST-CCR	1070	1544,41
46	CM S	1165	1681,53
47	L.Cemen Silo	1365	1970,21
48	L.Extraction	1365	1970,21
49	L.PPI	1496	2159,29
50	Load Center	800	1154,70

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA ARC FLASH DI PT. SEMEN PADANG

4.1 Hasil Simulasi Insiden Energi Arc Flash Menggunakan Perangkat Lunak ETAP 12.6.0 (Existing)

Simulasi insiden energi *arc flash* (busur api) dilakukan pada perangkat lunak ETAP 12.6.0 dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002. Simulasi dilakukan pada *single line diagram* PT. Semen Padang *Existing* dengan level tegangan 6,3 kV. Pada sub bab ini, akan ditampilkan data hasil simulasi besarnya insiden energi *arc flash* pada bus-bus sistem serta besarnya arus *bolted fault*, arus *arcing*, FCT (*Fault Clearing Time*), dan kategori bahaya. Dan untuk *working distance* atau jarak titik *arc flash* terhadap pekerja berdasarkan level tegangan 6,3 kV, tipikalnya menurut standar IEEE 1584-2002, yaitu sebesar 91 cm. Hasil simulasi besarnya insiden energi *arc flash* pada masing-masing bus dapat dilihat Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil simulasi insiden energi *arc flash* pada sistem *existing* PT. Semen Padang

BUS ID	Arus Bolted (kA)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori
Bus 5E1Q22	31,196	29,698	0,77	41,67	> Level 4
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	30,193	28,759	0,33	17,25	Level 3
BUS 5W1 KILN DRV	29,452	28,065	0,33	16,8	Level 3
BUS 5W2 COOLER	29,397	28,014	0,33	16,77	Level 3
BUS 21 KILN ID FAN	30,353	28,908	0,37	19,45	Level 3
Bus 5E1Q23	31,999	30,448	1,07	59,49	> Level 4
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	30,93	29,449	0,33	17,7	Level 3
BUS 5TB1 TAMBANG	26,224	25,038	0,404	18,18	Level 3
BUS 24 RAWMILL	26,439	25,239	0,404	18,33	Level 3
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	31,164	29,667	0,089	4,82	Level 2
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	30,658	29,194	0,33	17,53	Level 3
Bus 6S1Q21	31,288	29,784	0,77	41,8	> Level 4
BUS 158 SLC, SILICA	17,736	17,046	0,33	9,8	Level 3
BUS 348 RAWMILL DRIVE	25,384	24,249	0,33	14,34	Level 3

Tabel 4.1 Hasil simulasi insiden energi *arc flash* pada sistem *existing* PT. Semen Padang (lanjutan)

BUS ID	Arus Bolted (kA)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori
BUS 348 RAWMILL ID FAN	25,291	24,162	0,33	14,29	Level 3
Bus 6S1Q23	25,84	24,678	1,07	47,4	>Level 4
BUS 548 CEMENT MILL	21,323	20,43	0,553	19,98	Level 3

Dari hasil simulasi insiden energi *arc flash* pada sistem *existing* PT. Semen Padang masih terdapat beberapa bus yang memiliki nilai insiden energi *arc flash* melebihi kategori 4. Sedangkan berdasarkan standar NFPA 70E, alat pelindung diri untuk kategori diatas 4 tidak tersedia. Sehingga dalam kasus ini diperlukan *resetting* pada sistem koordinasi proteksi sistem kelistrikan PT. Semen Padang guna mendapatkan nilai insiden energi *arc flash* yang lebih rendah.

Resetting koordinasi proteksi sistem kelistrikan PT. Semen Padang dilakukan pada Bus 5E1Q22, Bus 5E1Q23, Bus 6S1Q21, dan Bus 6S1Q23. Bus-bus tersebut merupakan bus utama pada PT. Semen Padang. Sehingga akan terdapat 4 tipikal di-*setting* ulang sistem koordinasi proteksinya yang akan dipaparkan pada sub bab selanjutnya.

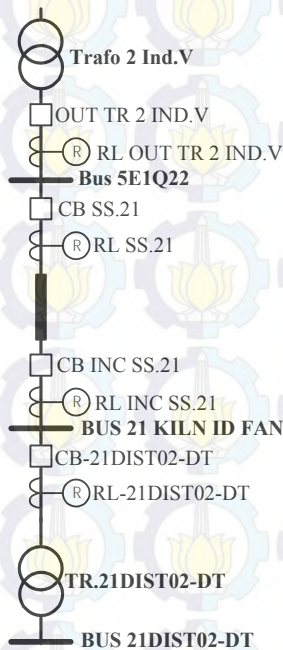
4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih

Studi koordinasi arus lebih digunakan untuk mengetahui waktu pemutusan CB (*Circuit Breaker*) ketika terjadi gangguan *arc flash*. Saat terjadi gangguan *arc flash*, rele tetap harus dapat bekerja secara selektif dalam melokalisir gangguan. Langkah pertama untuk melakukan koordinasi rele arus lebih dengan menganalisa kondisi *existing* pengaman. Analisa dilakukan dengan membuat plot rele-rele pada kurva TCC (*Time Current Curve*) pada *software* simulasi. Sehingga apabila rele tidak terkoordinasi dengan baik, maka diperlukan *resetting* pada rele arus lebih.

Koordinasi rele arus lebih yaitu dengan melakukan *setting* arus dan waktu. Pada perhitungan *setting* rele arus lebih ini akan dihitung nilai *low set*, *higt set*, dan *time dial*. Sedangkan untuk *time delay* dipilih *gradding time* sebesar 0.2 detik. Sehingga dari *setting* ini diharapkan rele-rele pengaman tidak ada yang bekerja lebih cepat atau secara bersamaan.

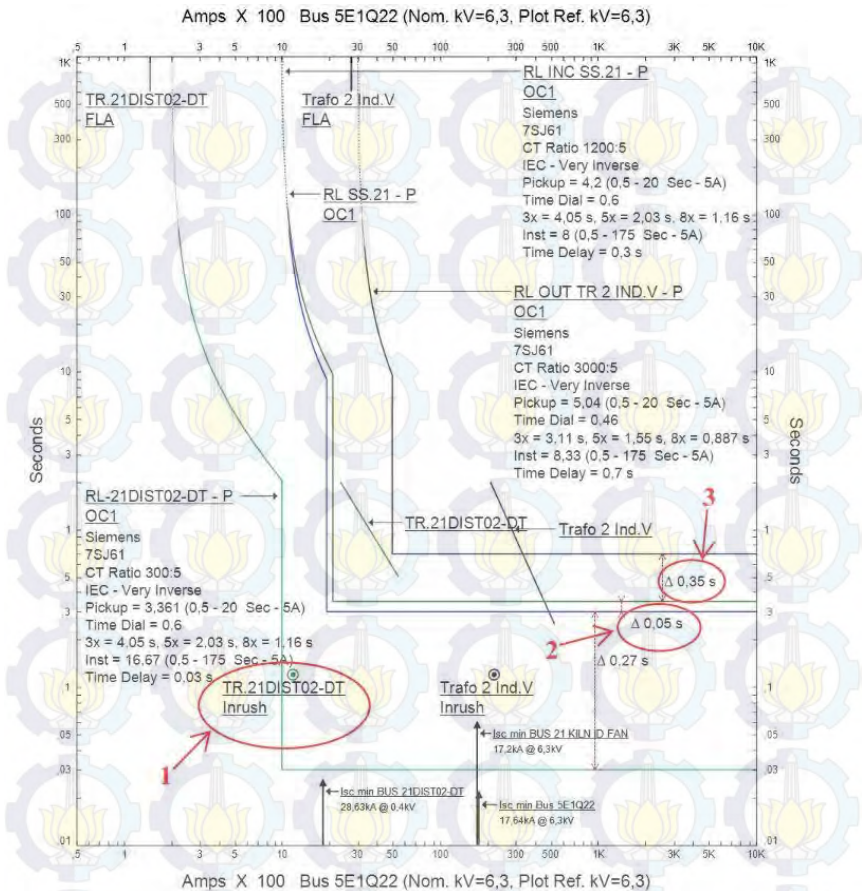
4.2.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1

Tipikal 1 ini merupakan koordinasi sistem pengamanan dari sekunder Trafo 2 Ind.V dengan kapasitas daya sebesar 30 MVA hingga trafo distribusi TR.21DIST02-DT dengan rating daya sebesar 1600 KVA. Adapun rele-rele yang dikoordinasikan antara lain rele RL-21DIST02-DT, rele INC SS.21, rele SS.21, dan RL OUT TR 2 IND.V. *Single Line Diagram* untuk Tipikal 1 dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 *Single Line Diagram* Tipikal 1

Pada koordinasi rele arus lebih Tipikal 1 terdapat beberapa koordinasi rele pengamanan yang masih harus diperbaiki, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada kurva koordinasi arus lebih yang ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Kurva koordinasi arus lebih Tipikal 1

Dari hasil plot kurva koordinasi arus lebih Tipikal 1 dapat dilihat masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat. Pada lingkaran 1 yaitu RL-21DIST02-DT akan selalu *trip* ketika terjadi arus pengisian (*inrush current*) pada trafo TR. 21DIST02-DT. Sedangkan untuk pengaman saluran RL INC SS.21 dan RL SS.21 yang ditandai dengan lingkaran 2 terdapat jeda waktu, sehingga waktu yang dibutuhkan dalam

melokalisasi gangguan akan semakin lama. Begitu pula untuk RL OUT TR 2 IND.V yang ditunjukkan pada lingkaran 3.

Dengan hasil analisa koordinasi rele arus lebih Tipikal 1, diperlukan *resetting* koordinasi rele arus lebih. Berikut perhitungannya.

Rele RL-21DIST02-DT

Manufaktur	Siemens
Model	7SJ61
Kurva	IEC- <i>Very Inverse</i>
Rasio CT	300/5
Isc max BUS 21DIST02-DT	35,2 kA (0,4 kV)
Isc max BUS 21 KILN ID FAN	26,43 kA
Isc min BUS 21 KILN ID FAN	17,2 kA
FLA Primer Trafo TR. 21DIST02-DT	146,6 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Prim TR. 21DIST02 - DT} < < 1,4 \times$$

$$\text{FLA Prim TR. 21DIST02}$$

$$1,05 \times 146,6 < < 1,4 \times 146,6$$

$$153,93 < < 205,24$$

$$\frac{153,93}{300/5} < < \frac{205,24}{300/5}$$

$$2,57 < < 3,42$$

$$\frac{153,93}{300/5} < < \frac{205,24}{300/5}$$

$$2,57 < < 3,42$$

$$2,57 < < 3,42$$

Dipilih Tap 2,7 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 162 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max BUS KILN ID FAN}}}{I_{SET}} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$= \frac{0,1 \left[\left(\frac{26430}{162} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$= 1,2$$

Dipilih $Td = 1,2$ detik

Instantaneous Pickup

Iscmax BUS 21DISTO2 – DT (6,3 kV) < < 0,8 ×

Iscmin BUS 21 KILN ID FAN

$$35200 \left(\frac{0,4 \text{ kV}}{6,3 \text{ kV}} \right) < < 0,8 \times 17200$$

$$2234,92 < < 13760$$

$$\frac{2234,92}{300/5} < < \frac{13760}{300/5}$$

$$\frac{2234,92}{300/5} < < \frac{13760}{300/5}$$

$$37,25 < < 229,33$$

Dipilih Tap 26 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 1560$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

Rele INC SS.21 dan Rele SS.21

Manufaktur	Siemens
Model	7SJ61
Kurva	IEC- <i>Very Inverse</i>
Rasio CT	1200/5
Isc max Bus 5E1Q22	27,14 kA
Isc min Bus 5E1Q22	17,64 kA
FLA BUS 21 KILN ID FAN	944,45 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA BUS 21 KILN ID FAN} - \text{DT} < < 1,4 \times$$

FLA BUS 21 KILN ID FAN

$$1,05 \times 944,45 < < 1,4 \times 944,45$$

$$991,67 < < 1322,23$$

$$\frac{991,67}{1200/5} < < \frac{1322,23}{1200/5}$$

$$\frac{991,67}{1200/5} < < \frac{1322,23}{1200/5}$$

$$4,13 < < 5,51$$

Dipilih Tap 4,1 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 984 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 5E1Q22}}}{984} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$= \frac{0,3 \left[\left(\frac{27140}{984} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$= 0,59$$

Dipilih $Td = 0,5$ detik

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA BUS 21 KILN ID FAN} < \quad < 0,8 \times$$

$$I_{sc \text{ min Bus 5E1Q22}}$$

$$1,6 \times 944,45 < \quad < 0,8 \times 17640$$

$$1511,12 < \quad < 14112$$

$$\frac{1511,12}{1200/5} < \quad < \frac{14112}{1200/5}$$

$$\frac{1511,12}{1200/5} < \quad < \frac{14112}{1200/5}$$

$$6,3 < \quad < 58,8$$

Dipilih Tap 50 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 12000$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

Rele RL OUT TR 2 IND.V

Manufaktur

Model

Kurva

Rasio CT

Isc max Kontribusi Sekunder Trafo 2 Ind.V

Isc min Kontribusi Sekunder Trafo 2 Ind.V

FLA Sekunder Trafo 2 Ind.V

Siemens

7SJ61

IEC-*Very Inverse*

3000/5

20,4 kA

17,64 kA

2749 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Sekunder Trafo 2 Ind. V} < < 1,4 \times$$

FLA Sekunder Trafo 2 Ind. V

$$1,05 \times 2749 < < 1,4 \times 2749$$

$$2886,45 < < 3848,6$$

$$\frac{2886,45}{3000/5} < < \frac{3848,6}{3000/5}$$

$$\frac{2886,45}{3000/5} < < \frac{3848,6}{3000/5}$$

$$4,81 < < 6,41$$

Dipilih Tap 4,85 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 2910 \text{ A}$$

Time Dial

$$\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Kontribusi Sekunder Trafo 2 Ind. V}}{I_{SET}} \right)^1 - 1 \right]$$

$$= \frac{13,5}{0,3 \left[\left(\frac{20400}{2910} \right)^1 - 1 \right]}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$= \frac{0,3 \left[\left(\frac{20400}{2910} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$= 0,22$$

Dipilih $Td = 0,23$ detik

Instantaneous Pickup

$$< 0,8 \times I_{sc \text{ min Kontribusi Sekunder Trafo 2 Ind. V}}$$

$$< 0,8 \times 17640$$

$$< 14112$$

$$< \frac{14112}{3000/5}$$

$$< \frac{14112}{3000/5}$$

$$< \frac{14112}{3000/5}$$

$$< \frac{14112}{3000/5}$$

$$< 23,52$$

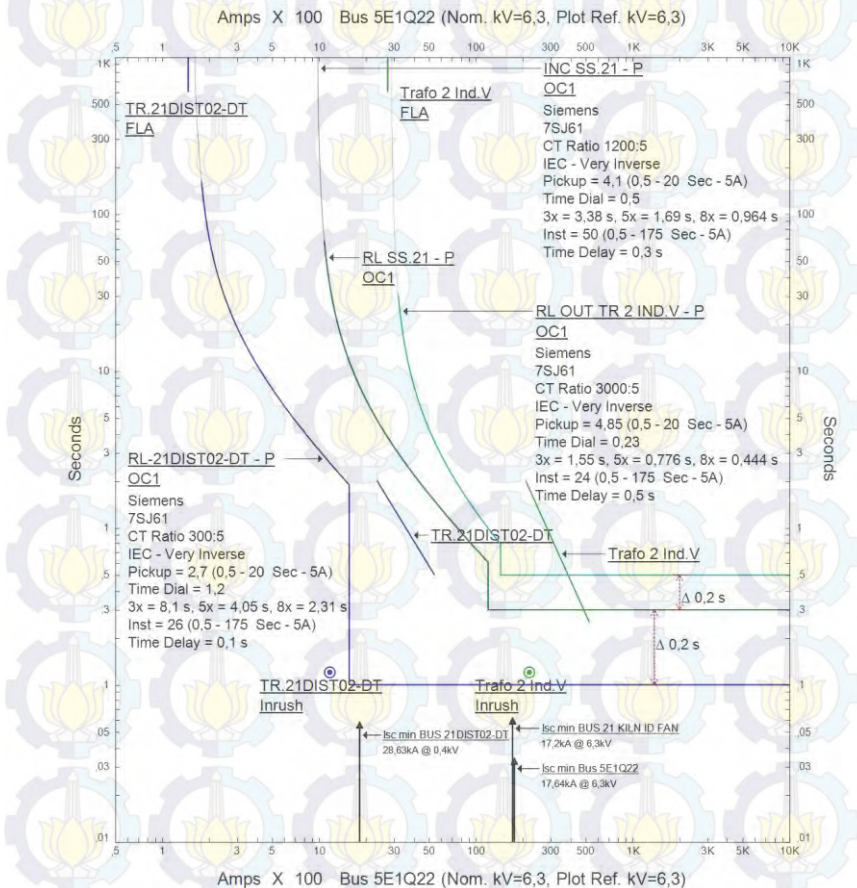
Dipilih Tap 24 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 14400$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

Dari hasil perhitungan tersebut, maka dapat diplot kurva arus waktu kondisi *resetting* pada Tipikal 1 dengan menggunakan program simulasi ETAP 12.6.0. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.3.

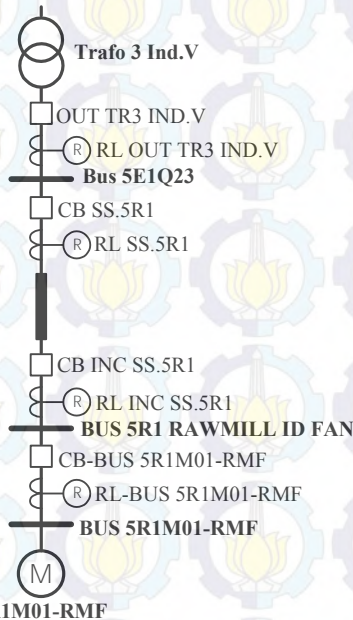


Gambar 4.3 Plot kurva pengaman *resetting* Tipikal 1

Dari gambar diatas, dapat dilihat waktu kerja rele satu dengan lainnya telah sesuai dengan *grading time*, serta rele RL-21DIST02-DT tidak memotong *inrush current* trafo TR.21DIST02-DT.

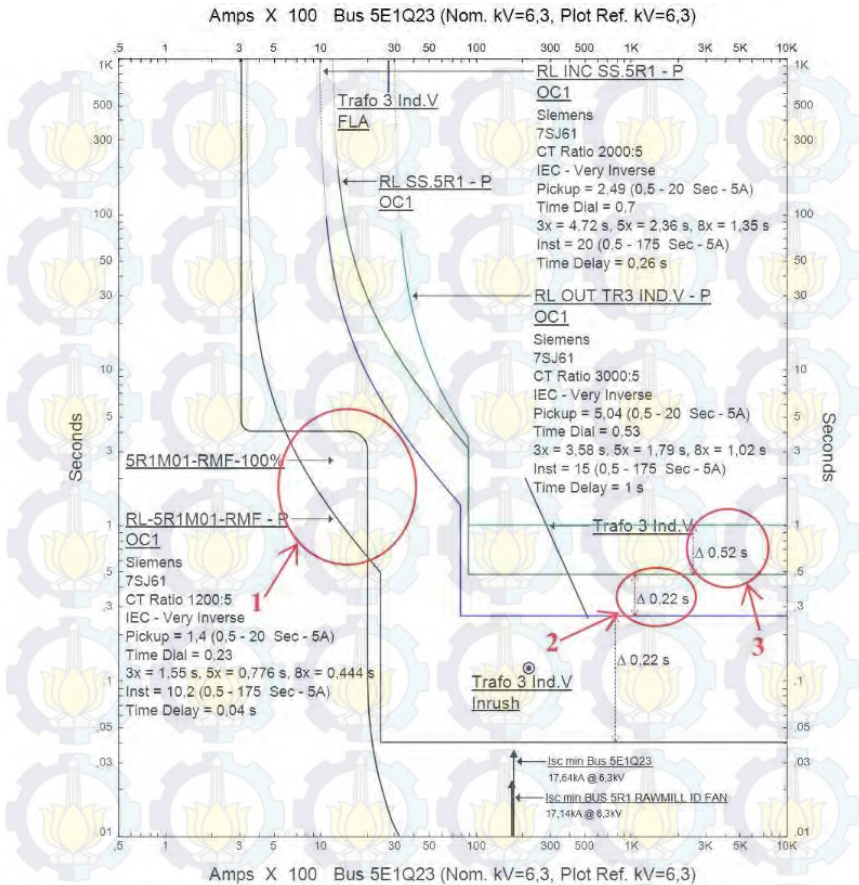
4.2.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 2

Tipikal 2 ini merupakan koordinasi sistem pengaman dari sekunder Trafo 3 Ind.V dengan kapasitas daya sebesar 30 MVA hingga beban motor induksi 5R1M01-RMF dengan rating 2900 KW. Adapun rele-rele yang dikoordinasikan antara lain rele RL-5R1M01-RMF, rele INC SS.5R1, rele SS.5R1, dan RL OUT TR 3 IND.V. *Single Line Diagram* untuk Tipikal 2 dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 *Single Line Diagram* Tipikal 2

Pada koordinasi rele arus lebih Tipikal 2 terdapat beberapa koordinasi rele pengaman yang masih harus diperbaiki, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada kurva koordinasi arus lebih yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Kurva koordinasi arus lebih Tipikal 2

Dari hasil plot kurva koordinasi arus lebih Tipikal 2 dapat dilihat masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat. Pada lingkaran 1 yaitu RL-5R1M01-RMF akan selalu *trip* ketika terjadi arus *starting* (*lock rotor current*) motor 5R1M01-RMF, sehingga motor tidak bisa *start*. Sedangkan untuk pengaman saluran RL INC SS.5R1 dan RL SS.5R1 yang ditandai dengan lingkaran 2 terdapat jeda waktu, sehingga waktu yang dibutuhkan dalam melokalisasi gangguan akan semakin lama. Begitu

pula untuk RL OUT TR 3 IND.V yang memiliki jeda waktu sebesar 0,52 detik yang ditunjukkan pada lingkaran 3.

Dengan hasil analisa koordinasi rele arus lebih Tipikal 2, diperlukan *resetting* koordinasi rele arus lebih. Berikut perhitungannya.

Rele RL-5R1M01-RMF

Manufaktur	Siemens
Model	7SJ61
Kurva	IEC- <i>Very Inverse</i>
Rasio CT	600/5
Isc max BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	26,29 kA
Isc min BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	17,14 kA
FLA 5R1M01-RMF	303,3 A
LRA 5R1M01-RMF	1972

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA } 5\text{R1M01} - \text{RMF} < < 1,4 \times \text{FLA } 5\text{R1M01} - \text{RMF}$$

$$1,05 \times 303,3 < < 1,4 \times 303,3$$

$$318,47 < < 424,62$$

$$\frac{318,47}{600/5} < < \frac{424,62}{600/5}$$

$$2,65 < < 3,54$$

$$\frac{318,47}{600/5} < < \frac{424,62}{600/5}$$

$$2,65 < < 3,54$$

$$2,65 < < 3,54$$

Dipilih Tap 2,7 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 324 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{[(\frac{1,3 \times \text{LRA } 5\text{R1M01} - \text{RMF}}{I_{SET}})^1 - 1]}{13,5}$$

$$= \frac{[(\frac{1,3 \times 1972}{324})^1 - 1]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 4 detik

$$4 \times \frac{[(\frac{1,3 \times 1972}{324})^1 - 1]}{13,5}$$

$$= \frac{4 \times [(\frac{1,3 \times 1972}{324})^1 - 1]}{13,5}$$

$$= 2,05$$

Dipilih $T_d = 2,05$ detik

Instantaneous Pickup

LRA 5R1M01 – RMF $< 0,8 \times$

Isc min BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$1972 < 0,8 \times 17140$

$1972 < 13712$

$1972 < 13712$

$\frac{1972}{600/5} < \frac{13712}{600/5}$

$16,43 < 114,27$

Dipilih Tap 22 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$I_{SET} = 2640$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

Rele RL INC SS.5R1 dan Rele RL SS.5R1

Manufaktur

Siemens

Model

7SJ61

Kurva

IEC-Very Inverse

Rasio CT

800/5

Isc max Bus 5E1Q23

27,1 kA

Isc min Bus 5E1Q23

17,64 kA

FLA BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

670,63 A

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA BUS 5R1 RAWMILL ID FAN} < 1,4 \times$

FLA BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$1,05 \times 670,63 < 1,4 \times 670,63$

$704,16 < 938,88$

$704,16 < 938,88$

$\frac{704,16}{800/5} < \frac{938,88}{800/5}$

$\frac{704,16}{800/5} < \frac{938,88}{800/5}$

$$4,4 < \quad < 5,87$$

Dipilih Tap 4,45 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 712 \text{ A}$$

Time Dial

$$\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 5E1 Q23}}}{I_{SET}} \right)^1 - 1 \right]$$

$$= \frac{13,5}{0,3 \left[\left(\frac{27100}{712} \right)^1 - 1 \right]}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$= \frac{0,3 \left[\left(\frac{27100}{712} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$= 0,82$$

$$\text{Dipilih } Td = 0,88 \text{ detik}$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA BUS 5R1 RAWMILL ID FAN} < \quad < 0,8 \times$$

$$I_{sc \text{ min Bus 5E1 Q23}}$$

$$1,6 \times 670,63 < \quad < 0,8 \times 17640$$

$$1073,01 < \quad < 14112$$

$$\frac{1073,01}{800/5} < \quad < \frac{14112}{800/5}$$

$$1073,01 < \quad < 14112$$

$$\frac{1073,01}{800/5} < \quad < \frac{14112}{800/5}$$

$$6,71 < \quad < 88,2$$

$$6,71 < \quad < 88,2$$

Dipilih Tap 48 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 7680$$

Time Delay

Dipilih Time Delay 0,3 detik

Rele RL OUT TR 3 IND.V

Manufaktur

Siemens

Model

7SJ61

Kurva

IEC-Very Inverse

Rasio CT

3000/5

Isc max Kontribusi Sekunder Trafo 3 Ind.V

20,4 kA

Isc min Kontribusi Sekunder Trafo 3 Ind.V

17,64 kA

FLA Sekunder Trafo 3 Ind.V

2749 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Sekunder Trafo 3 Ind. V} < 1,4 \times$$

$$\text{FLA FLA Sekunder Trafo 3 Ind. V}$$

$$1,05 \times 2749 < 1,4 \times 2749$$

$$2886,45 < 3848,6$$

$$\frac{2886,45}{3000/5} < \frac{3848,6}{3000/5}$$

$$\frac{2886,45}{3000/5} < \frac{3848,6}{3000/5}$$

$$4,81 < 6,41$$

Dipilih Tap 4,85 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 2910 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Kontribusi Sekunder Trafo 3 Ind. V}}{I_{SET}} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$= \frac{0,3 \left[\left(\frac{20400}{2910} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$= 0,22$$

Dipilih $Td = 0,22$ detik

Instantaneous Pickup

$$< 0,8 \times I_{sc \text{ min Kontribusi Sekunder Trafo 3 Ind. V}}$$

$$< 0,8 \times 17640$$

$$< 14112$$

$$< \frac{14112}{3000/5}$$

$$< 23,52$$

$$< \frac{14112}{3000/5}$$

$$< 23,52$$

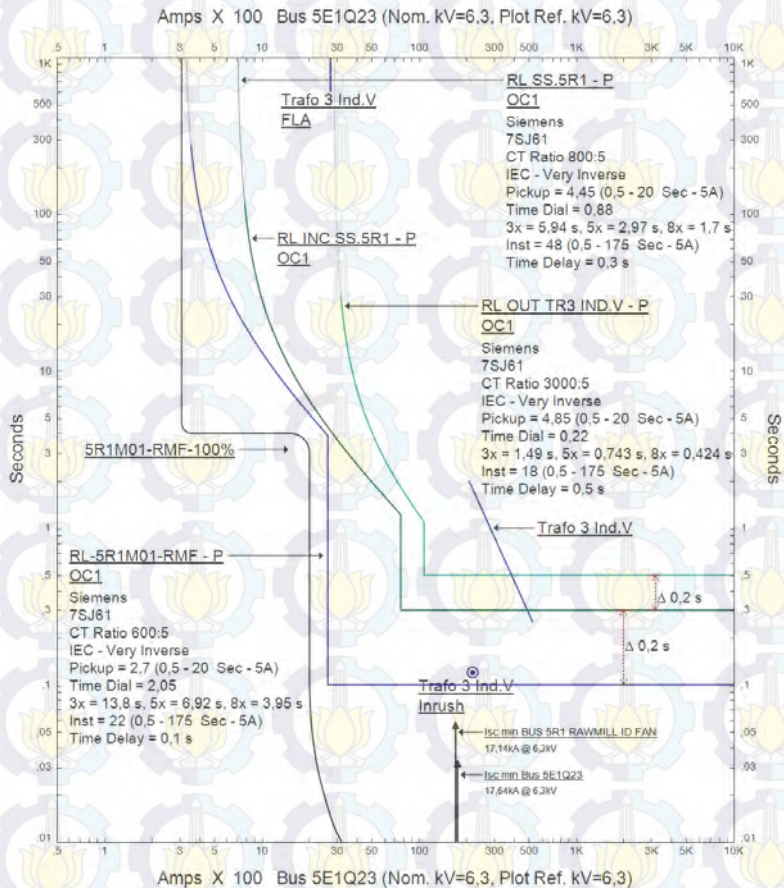
Dipilih Tap 18 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 10800$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

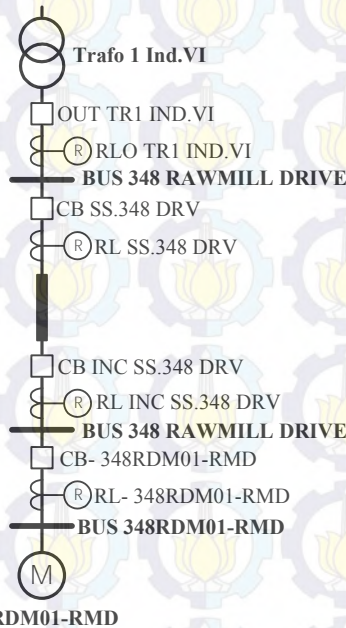
Dari hasil perhitungan ini, maka dapat diplot kurva arus waktu kondisi *resetting* pada Tipikal 2 dengan menggunakan program simulasi ETAP 12.6.0. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Plot kurva pengaman *resetting* Tipikal 2

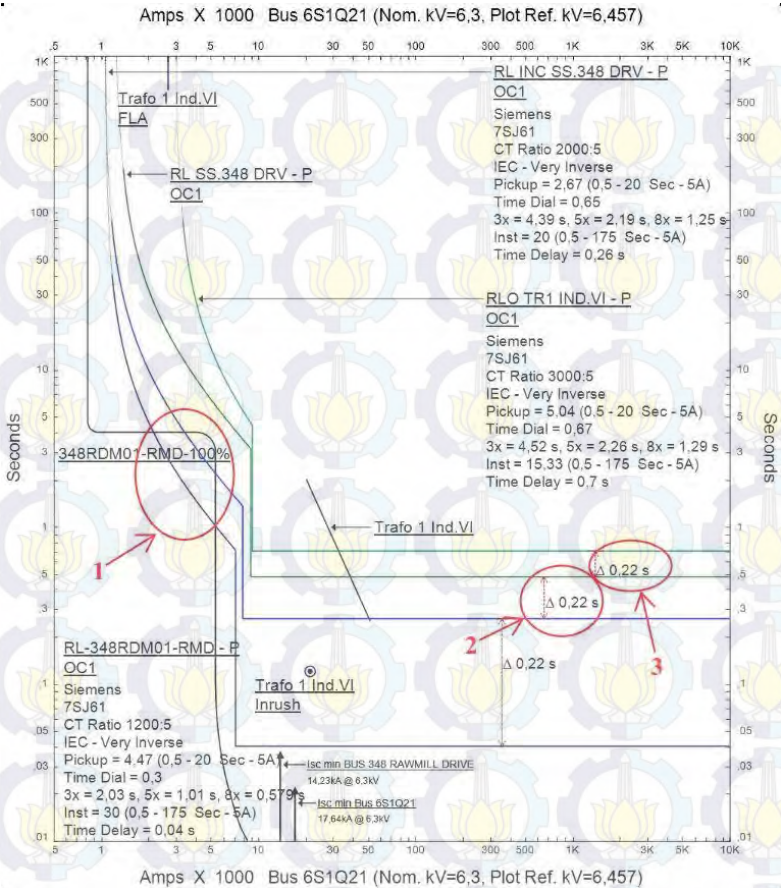
4.2.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 3

Tipikal 3 ini merupakan koordinasi sistem pengaman dari sekunder Trafo 1 Ind.VI dengan kapasitas daya sebesar 30 MVA hingga beban motor induksi 348RDM01-RMD dengan rating 7830 KW. Adapun rele-rele yang dikoordinasikan antara lain rele RL-348RDM01-RMD, rele INC SS.348 DRV, rele SS.348 DRV, dan RLO TR 1 IND.VI. *Single Line Diagram* untuk Tipikal 3 dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 *Single Line Diagram* Tipikal 3

Pada koordinasi rele arus lebih Tipikal 3 terdapat beberapa koordinasi rele pengaman yang masih harus diperbaiki, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada kurva koordinasi arus lebih yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Kurva koordinasi arus lebih Tipikal 3

Dari hasil plot kurva koordinasi arus lebih Tipikal 3 dapat dilihat masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat. Pada lingkaran 1 yaitu RL-348RDM01-RMD akan selalu *trip* ketika terjadi arus *starting* (*lock rotor current*) motor 348RDM01-RMD, sehingga motor tidak bisa *start*. Sedangkan untuk pengaman saluran RL INC SS.348 DRV dan RL SS.348 DRV yang ditandai dengan lingkaran 2 terdapat jeda waktu, sehingga waktu yang dibutuhkan dalam melokalisasi gangguan akan

semakin lama. Begitu pula untuk RL OUT TR 1 IND.VI dengan waktu jeda 0,22 detik yang ditunjukkan pada lingkaran 3.

Dengan hasil analisa koordinasi rele arus lebih Tipikal 3, diperlukan *resetting* koordinasi rele arus lebih. Berikut perhitungannya.

Rele RL-348RDM01-RMD

Manufaktur	Siemens
Model	7SJ61
Kurva	IEC- <i>Very Inverse</i>
Rasio CT	1000/5
Isc max BUS 348RDM01-RMD	22,63 kA
Isc min BUS 348RDM01-RMD	14,23 kA
FLA 348RDM01-RMD	824,8 A
LRA 348RDM01-RMD	5361

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA 348RDM01 - RMD} < < 1,4 \times \text{FLA 348RDM01 - RMD}$$

$$1,05 \times 824,8 < < 1,4 \times 824,8$$

$$824,8 < < 1154,72$$

$$\frac{824,8}{1000/5} < < \frac{1154,72}{1000/5}$$

$$\frac{824,8}{1000/5} < < \frac{1154,72}{1000/5}$$

$$4,33 < < 5,77$$

Dipilih Tap 4,4 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 880 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{[(1,3 \times \text{LRA 348RDM01 - RMD})^1 - 1]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 4 detik

$$= \frac{4 [(\frac{1,3 \times 5361}{880})^1 - 1]}{13,5}$$

$$= 13,5$$

$$= 2,05$$

Dipilih $T_d = 1,7$ detik

Instantaneous Pickup

$$\text{LRA 348RDM01} - \text{RMD} < < 0,8 \times I_{sc \text{ min BUS 348RDM01}} -$$

RMD

$$5361 < < 0,8 \times 14230$$

$$5361 < < 11384$$

$$\frac{5361}{1000/5} < < \frac{11384}{1000/5}$$

$$22,34 < < 47,43$$

$$\frac{5361}{1000/5} < < \frac{11384}{1000/5}$$

$$22,34 < < 47,43$$

Dipilih Tap 34 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 6800$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

Rele RL INC SS.348 DRV dan Rele RL SS.348 DRV

Manufaktur

Siemens

Model

7SJ61

Kurva

IEC-Very Inverse

Rasio CT

1200/5

Isc max Bus 6S1Q21

27,61 kA

Isc min Bus 6S1Q21

17,64 kA

FLA BUS 348 RAWMILL DRIVE

965,18 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA BUS 348 RAWMILL DRIVE} < < 1,4 \times$$

FLA BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$1,05 \times 965,18 < < 1,4 \times 965,18$$

$$1013,44 < < 1351,25$$

$$1013,44 < < 1351,25$$

$$\frac{1013,44}{1200/5} < < \frac{1351,25}{1200/5}$$

$$4,22 < < 5,63$$

$$\frac{1013,44}{1200/5} < < \frac{1351,25}{1200/5}$$

$$4,22 < < 5,63$$

Dipilih Tap 3,9 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 936 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 6S1Q21}}}{13,5} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$= \frac{0,3 \left[\left(\frac{27610}{936} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$= 0,63$$

Dipilih $Td = 1,8$ detik

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA BUS 348 RAWMILL DRIVE} < < 0,8 \times$$

$$I_{sc \text{ min Bus 6S1Q21}}$$

$$1,6 \times 965,18 < < 0,8 \times 17640$$

$$1544,29 < < 14112$$

$$1544,29 < < 14112$$

$$\frac{1544,29}{1200/5} < < \frac{14112}{1200/5}$$

$$6,43 < < 58,8$$

$$6,43 < < 58,8$$

$$6,43 < < 58,8$$

Dipilih Tap 35 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 8400$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

Rele RLO TR1 IND.VI

Manufaktur

Siemens

Model

7SJ61

Kurva

IEC-*Very Inverse*

Rasio CT

3000/5

Isc max Kontribusi Sekunder Trafo 1 Ind.VI

20,4 kA

Isc min Kontribusi Sekunder Trafo 1 Ind.VI

17,64 kA

FLA Sekunder Trafo 3 Ind.V

2749 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Sekunder Trafo 1 Ind. VI} < \quad < 1,4 \times$$

$$\text{FLA FLA Sekunder Trafo 1 Ind. VI}$$

$$1,05 \times 2749 < \quad < 1,4 \times 2749$$

$$2886,45 < \quad < 3848,6$$

$$\frac{2886,45}{\quad} < \quad < \frac{3848,6}{\quad}$$

$$\frac{2886,45}{3000/5} < \quad < \frac{3848,6}{3000/5}$$

$$4,81 < \quad < 6,41$$

Dipilih Tap 4,85 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 2910 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{\left[\left(\frac{\text{Isc max Kontribusi Sekunder Trafo 1 Ind. VI}}{13,5} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$= \frac{0,3 \left[\left(\frac{20400}{2910} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$
$$= 0,22$$

Dipilih $Td = 0,6$ detik

Instantaneous Pickup

$$< 0,8 \times \text{Isc min Kontribusi Sekunder Trafo 1 Ind. VI}$$

$$< 0,8 \times 17640$$

$$< 14112$$

$$< \frac{14112}{\quad}$$

$$< \frac{14112}{\quad}$$

$$< \frac{3000/5}{\quad}$$

$$< 23,52$$

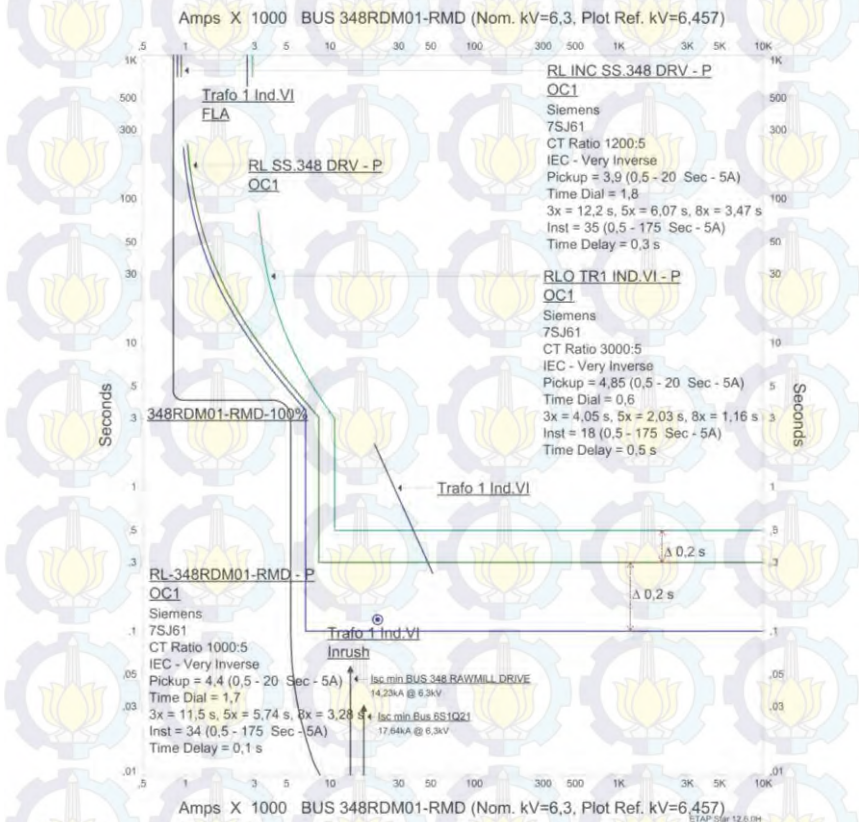
Dipilih Tap 18 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 10800$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

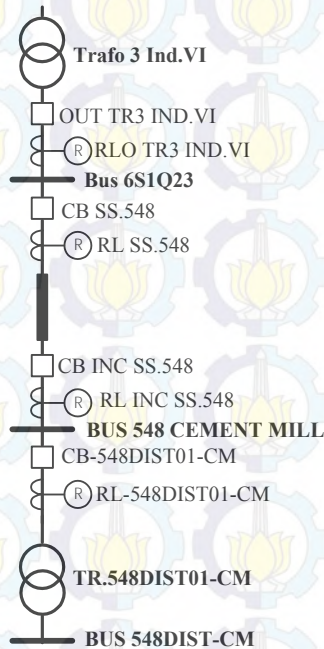
Dari hasil perhitungan ini, maka dapat diplot kurva arus waktu kondisi *resetting* pada Tipikal 3 dengan menggunakan program simulasi ETAP. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Plot kurva pengaman *resetting* Tipikal 3

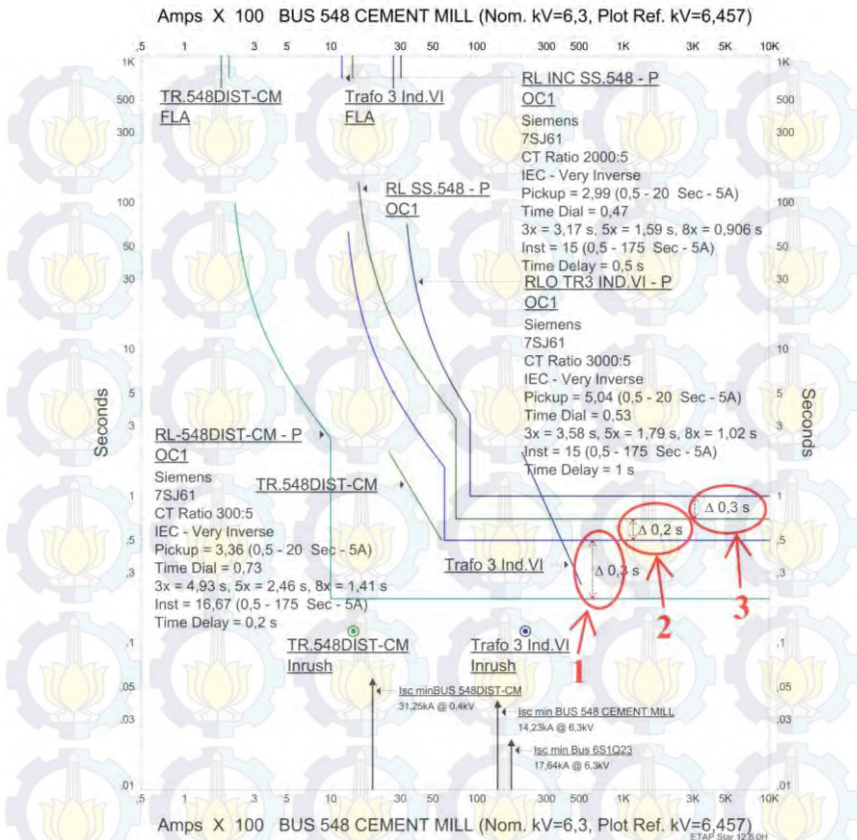
4.2.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 4

Tipikal 4 ini merupakan koordinasi sistem pengaman dari sekunder Trafo 3 Ind.VI dengan kapasitas daya sebesar 30 MVA hingga trafo distribusi TR.548DIST01-CM dengan rating daya sebesar 2000 KVA. Adapun rele-rele yang dikoordinasikan antara lain rele RL-548DIST01-CM, rele INC SS.548, rele SS.548, dan RLO TR3 IND.VI. *Single Line Diagram* untuk Tipikal 4 dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 *Single Line Diagram* Tipikal 4

Pada koordinasi rele arus lebih Tipikal 1 terdapat beberapa koordinasi rele pengaman yang masih harus diperbaiki, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada kurva koordinasi arus lebih yang ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Kurva koordinasi arus lebih Tipikal 4

Dari hasil plot kurva koordinasi arus lebih Tipikal 4 dapat dilihat masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat. Pada lingkaran 1 yaitu RL-548DIST01-CM akan selalu trip ketika terjadi arus pengisian (*inrush current*) pada trafo TR.548DIST01-CM. Sedangkan untuk pengaman saluran RL INC SS.548 dan RL SS.548 yang ditandai dengan lingkaran 2 terdapat jeda waktu, sehingga waktu yang dibutuhkan dalam melokalisir gangguan akan semakin lama. Begitu pula untuk RLO TR3 IND.VI dengan waktu jeda 0,3 detik yang ditunjukkan pada lingkaran 3.

Dengan hasil analisa koordinasi rele arus lebih Tipikal 4, diperlukan *resetting* koordinasi rele arus lebih. Berikut perhitungannya.

Rele RL-548DIST01-CM

Manufaktur	Siemens
Model	7SJ61
Kurva	IEC- <i>Very Inverse</i>
Rasio CT	300/5
Isc max BUS 548DIST-CM	39,1 kA (0,4 kV)
Isc max BUS 548 CEMENT MILL	19,61 kA
Isc min BUS 548 CEMENT MILL	14,23 kA
FLA Primer Trafo TR.548DIST01-CM	183,3 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Prim TR. 548DIST01 - CM} < 1,4 \times$$

$$\text{FLA Prim TR. 548DIST01 - CM}$$

$$1,05 \times 183,3 < 1,4 \times 183,3$$

$$192,47 < 256,62$$

$$\frac{192,47}{300/5} < \frac{256,62}{300/5}$$

$$\frac{192,47}{300/5} < \frac{256,62}{300/5}$$

$$3,21 < 4,28$$

Dipilih Tap 3,25 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 195 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{[(\frac{\text{Isc max BUS 548 CEMENT MILL}}{195})^1 - 1]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$= \frac{0,1 [(\frac{19610}{195})^1 - 1]}{13,5}$$

$$= 0,74$$

Dipilih $Td = 0,7$ detik

Instantaneous Pickup

Iscmax BUS 548DIST – CM(6,3 kV) < < 0,8 ×

Iscmin BUS 548 CEMENT MILL

$$39100 \left(\frac{0,4 \text{ kV}}{6,3 \text{ kV}} \right) < < 0,8 \times 17640$$

$$2482,54 < < 14112$$

$$\frac{2482,54}{300/5} < < \frac{14112}{300/5}$$

$$\frac{2482,54}{300/5} < < \frac{14112}{300/5}$$

$$41,38 < < 235,2$$

Dipilih Tap 29 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 1740$$

Time Delay

Dipilih Time Delay 0,1 detik

Rele RL INC SS.548 dan Rele RL SS.548

Manufaktur	Siemens
Model	7SJ61
Kurva	IEC- <i>Very Inverse</i>
Rasio CT	2000/5
Isc max Bus 6S1Q23	24,02 kA
Isc min Bus 6S1Q23	17,64 kA
FLA BUS 548 CEMENT MILL	1051,09 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA BUS 548 CEMENT MILL} < < 1,4 \times$$

FLA BUS 548 CEMENT MILL

$$1,05 \times 1051,09 < < 1,4 \times 1051,09$$

$$1103,64 < < 1471,53$$

$$\frac{1103,64}{2000/5} < < \frac{1471,53}{2000/5}$$

$$\frac{1103,64}{2000/5} < < \frac{1471,53}{2000/5}$$

$$2,76 < < 3,68$$

Dipilih Tap 2,8 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 1120 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 6S1Q23}}}{1120} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$= \frac{0,3 \left[\left(\frac{24020}{1120} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$= 0,45$$

Dipilih $Td = 0,5$ detik

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA BUS 548 CEMENT MILL} < \dots < 0,8 \times$$

$$I_{sc \text{ min Bus 6S1Q23}}$$

$$1,6 \times 1051,09 < \dots < 0,8 \times 17640$$

$$1681,74 < \dots < 14112$$

$$1681,74 < \dots < 14112$$

$$\frac{1681,74}{2000/5} < \dots < \frac{14112}{2000/5}$$

$$4,2 < \dots < 35,28$$

Dipilih Tap 19 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 7600$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

Rele RLO TR3 IND.VI

Manufaktur

Model

Kurva

Rasio CT

Isc max Kontribusi Sekunder Trafo 3 Ind.VI

Isc min Kontribusi Sekunder Trafo 3 Ind.VI

FLA Sekunder Trafo 2 Ind.V

Siemens

7SJ61

IEC-*Very Inverse*

3000/5

20,4 kA

17,64 kA

2749 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Sekunder Trafo 3 Ind. VI} < 1,4 \times$$

$$\text{FLA FLA Sekunder Trafo 3 Ind. VI}$$

$$1,05 \times 2749 < 1,4 \times 2749$$

$$2886,45 < 3848,6$$

$$\frac{2886,45}{3000/5} < \frac{3848,6}{3000/5}$$

$$\frac{2886,45}{3000/5} < \frac{3848,6}{3000/5}$$

$$4,81 < 6,41$$

Dipilih Tap 4,85 (Range 0,5 – 20 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 2910 \text{ A}$$

Time Dial

$$= \frac{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Kontribusi Sekunder Trafo 3 Ind. VI}}{I_{SET}} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$= \frac{0,3 \left[\left(\frac{20400}{2910} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$
$$= 0,22$$

Dipilih $Td = 0,28$ detik

Instantaneous Pickup

$$< 0,8 \times I_{sc \text{ min Kontribusi Sekunder Trafo 3 Ind. VI}}$$

$$< 0,8 \times 17640$$

$$< 14112$$

$$< \frac{14112}{3000/5}$$

$$< 23,52$$

$$< \frac{14112}{3000/5}$$

$$< 23,52$$

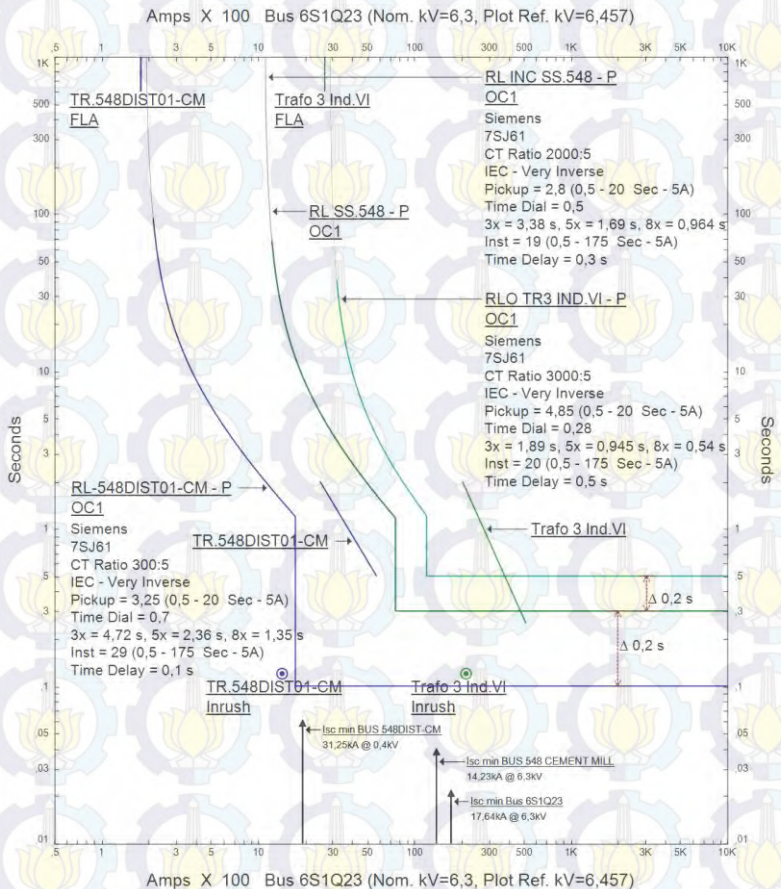
Dipilih Tap 20 A (Range 0,5 – 175 Sec – 5A)

$$I_{SET} = 12000$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

Dari hasil perhitungan ini, maka dapat diplot kurva arus waktu kondisi *resetting* pada Tipikal 4 dengan menggunakan program simulasi ETAP 12.6.0. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Plot kurva pengamanan *resetting* Tipikal 4

4.3 Hasil Simulasi Insiden Energi Arc Flash Pada Sistem Resetting

Setelah dilakukan *resetting* koordinasi proteksi pada empat tipikal yang telah dihitung pada sub-bab sebelumnya, dengan menggunakan program simulasi ETAP 12.6.0, besarnya insiden energi *arc flash* pada tiap-tiap bus dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil simulasi insiden energi *arc flash* pada PT. Semen Padang setelah *resetting*

BUS ID	Arus Bolted (kA)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori
Bus 5E1Q22	31,196	29,698	0,57	30,85	Level 4
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	30,193	28,759	0,37	19,34	Level 3
BUS 5W1 KILN DRV	29,452	28,065	0,37	18,83	Level 3
BUS 5W2 COOLER	29,397	28,014	0,37	18,8	Level 3
BUS 21 KILN ID FAN	30,353	28,908	0,37	19,45	Level 3
Bus 5E1Q23	31,999	30,448	0,57	31,69	Level 4
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	30,93	29,449	0,37	19,84	Level 3
BUS 5TB1 TAMBANG	26,224	25,038	0,37	16,65	Level 3
BUS 24 RAWMILL	26,439	25,239	0,37	16,79	Level 3
BUS 32 KILN IHC/LC2.1	31,164	29,667	0,37	20	Level 3
BUS 33 KILN IIB/LC2.0	30,658	29,194	0,37	19,66	Level 3
Bus 6S1Q21	31,288	29,784	0,57	30,94	Level 4
BUS 158 SLC, SILICA	17,736	17,046	0,37	10,99	Level 3
BUS 348 RAWMILL DRIVE	25,384	24,249	0,37	16,08	Level 3
BUS 348 RAWMILL ID FAN	25,291	24,162	0,37	16,02	Level 3
Bus 6S1Q23	25,84	24,678	0,57	25,25	Level 4
BUS 548 CEMENT MILL	21,323	20,43	0,37	13,36	Level 3

Dari hasil simulasi tersebut, dapat dilihat beberapa bus mengalami peningkatan maupun penurunan nilai insiden energi *arc flash* dari sistem *resetting* terhadap sistem *existing*. Bus yang mengalami penurunan nilai insiden *arc flash* diakibatkan *setting* waktu sistem koordinasi proteksi pada sistem *existing* kurang tepat. Atau dengan kata lain, *setting* waktu yang diterapkan pada sistem proteksi terlalu lama. Hal ini mengakibatkan kinerja peralatan proteksi ikut melambat dalam melokalisir gangguan. Terlambatnya peralatan proteksi dalam melokalisir gangguan akan mengakibatkan gangguan semakin besar serta menimbulkan *arc flash*.

Sama halnya dengan bus-bus yang mengalami peningkatan nilai insiden energi *arc flash* pada sistem *resetting* terhadap sistem *existing*. *Setting* waktu sistem proteksi yang diterapkan pada sistem *existing* kurang tepat. Letak perbedaanya adalah *setting* waktu yang diterapkan pada sistem *existing* lebih cepat dibandingkan dengan sistem *resetting*. Sehingga ada beberapa peralatan proteksi yang bekerja terlebih dahulu tanpa sesuai dengan *gradding time* atau bahkan bekerja secara bersamaan antara peralatan proteksi yang satu dengan yang lainnya. Sehingga, peralatan proteksi dalam hal ini rele, dikoordinasi ulang (*resetting*) yang mengakibatkan waktu kerja rele pada sistem *resetting* terhadap sistem *existing* lebih lama.

4.3.1 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Sistem Resetting Dengan Standar IEEE 1584-2002

Untuk membandingkan besarnya insiden energi *arc flash* hasil simulasi program ETAP 12.6.0 terhadap perhitungan, maka dilakukan perhitungan menggunakan metode yang sama yaitu standar IEEE 1584-2002, dengan tegangan sistem 6,3 kV untuk *switchgear ungrounded system* pada sistem kelistrikan PT. Semen Padang ($C_f = 1,0$; $K_1 = -0,555$; $K_2 = 0$; $G = 153 \text{ mm}$; $x = 0,973$; $D = 914,4 \text{ mm}$). Dengan menggunakan persamaan (2.5), maka besarnya insiden energi *arc flash* menjadi:

$$E = 1 \times \left(1,00929 I_{bf}^{0,983} \right)^{1,081} \times 10^{(-0,555 + 0 + 0,0011 \cdot 153)} \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610}{914,4} \right)^{0,973}$$

$$E = 1,39814 \times I_{bf}^{1,062623} \times t \dots\dots\dots (4.1)$$

Dengan menggunakan persaman (4.1), perhitungan besarnya insiden energi *arc flash* pada masing-masing bus adalah :

Bus 5E1Q22

$$I_{bf} = 31,196 ; t = 0,57$$

$$= 1,39814 \times 31,296^{1,062623} \times 0,57$$

$$= \dots\dots\dots /$$

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN

$$Ibf = 30,193 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 30,193^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 5W1 KILN DRV

$$Ibf = 29,452 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 29,452^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 5W2 COOLER

$$Ibf = 29,397 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 29,397^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 21 KILN ID FAN

$$Ibf = 30,353 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 30,353^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

Bus 5E1Q23

$$Ibf = 31,999 ; t = 0,57$$

$$= 1,39814 \times 31,999^{1,062623} \times 0,57$$

$$= , /$$

BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$$Ibf = 30,93 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 30,93^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 5TB1 TAMBANG

$$Ibf = 26,224 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 26,224^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 24 RAWMILL

$$Ibf = 26,439 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 26,439^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 32 KILN IIIC/LC2.1

$$Ibf = 31,164 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 31,164^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 33 KILN IIIB/LC2.0

$$Ibf = 30,658 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 30,658^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

Bus 6S1Q21

$$Ibf = 31,288 ; t = 0,57$$

$$= 1,39814 \times 31,288^{1,062623} \times 0,57$$

$$= , /$$

BUS 158 SLC, SILICA

$$Ibf = 17,736 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 17,736^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$Ibf = 25,384 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 25,384^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

BUS 348 RAWMILL ID FAN

$$Ibf = 25,291 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 25,291^{1,062623} \times 0,37$$

$$= , /$$

Bus 6S1Q23

$$Ibf = 25,84 ; t = 0,57$$

$$= 1,39814 \times 25,84^{1,062623} \times 0,57$$

$$= \quad , \quad /$$

BUS 548 CEMENT MILL

$$Ibf = 21,323 ; t = 0,37$$

$$= 1,39814 \times 21,323^{1,062623} \times 0,37$$

$$= \quad , \quad /$$

4.3.2 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Sistem Resetting Dengan Metode Modifikasi

Pada perhitungan metode modifikasi, insiden energi *arc flash* diperoleh dengan beberapa pertimbangan, antara lain berkurangnya besar kontribusi arus hubung singkat berdasarkan periode gelombang arus hubung singkat, waktu pemutusan masing-masing *circuit breaker* yang menuju titik gangguan, dan juga kontribusi arus hubung singkat dari motor induksi berdasarkan kapasitasnya.

Dengan metode modifikasi perhitungan, kontribusi arus hubung singkat masing-masing beban akan dikelompokkan kedalam beberapa domain waktu seperti yang telah ditunjukkan dalam Tabel 2.5 Berikut perhitungan insiden energi *arc flash* pada masing-masing bus :

Bus 5E1Q22 (FCT = 0,57)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (3,987 + 0,776 + 1,311 + 4,603 + 0,128 + 20,413)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,895 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (2,646 + 0,34 + 0,757 + 2,95 + 0,053 + 20,4)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,57 detik

$$_{0,57} = 1,39814 \times (2,618 + 0,57 + 2,74 + 20,396)^{1,062623} \times 0,49$$

$$_{0,57} = 22,133 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus 5E1Q22

$$= \quad , \quad + \quad , \quad + \quad ,$$
$$= \quad , \quad /$$

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (26,189 + 0,072 + 1,971 + 1,971)^{1,062623} \times$$
$$_{0,035}$$

$$_{0,035} = 1,83 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (23,669 + 0,029 + 1,314 + 1,314)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,033 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (22,939 + 1,314 + 1,314)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 12,699 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5R2 RAWMILL ID FAN

$$= \quad , \quad + \quad , \quad + \quad ,$$
$$= \quad , \quad /$$

BUS 5W1 KILN DRV (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (28,676 + 0,087 + 0,137 + 0,562)^{1,062623} \times$$
$$_{0,035}$$

$$_{0,035} = 1,782 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (25,443 + 0,036 + 0,057 + 0,252)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,989 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (25,022)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 12,412 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5W1 KILN DRV

$$= \quad , \quad + \quad , \quad + \quad ,$$
$$= \quad , \quad /$$

BUS 5W2 COOLER (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (28,085 + 0,155 + 0,161 + 0,161 + 0,856)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,779 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (24,974 + 0,064 + 0,066 + 0,066 + 0,571)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,985 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (24,415 + 0,571)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 12,393 \text{ cal/cm}^2$$

Total Isiden Energi BUS 5W2 COOLER

$$= , + , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 21 KILN ID FAN (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (25,722 + 0,13 + 0,191 + 0,213 + 1,634 + 1,634 + 0,856)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,841 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (23,470 + 0,054 + 0,08 + 0,09 + 1,089 + 1,089 + 0,571)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,042 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (22,904 + 1,089 + 1,089 + 0,571)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 12,745 \text{ cal/cm}^2$$

Total Isiden Energi BUS 21 KILN ID FAN

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

Bus 5E1Q23 (FCT = 0,57)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (3,997 + 0,401 + 0,601 + 4,053 + 2,593 + 20,413)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,949 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (2,65 + 0,166 + 0,25 + 2,116 + 1,547 + 20,4)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,099 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,57 detik

$$_{0,57} = 1,39814 \times (2,618 + 1,142 + 1,257 + 20,397)^{1,062623} \times 0,49$$

$$_{0,57} = 21,321 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus 5E1Q23

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 5R1 RAWMILL ID FAN (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (26,917 + 0,083 + 1,971 + 1,971)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,877 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (23,63 + 0,034 + 1,314 + 1,314)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,03 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (22,086 + 1,314 + 1,314)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 12,25 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 5TB1 TAMBANG (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (25,828 + 0,122 + 0,135 + 0,145)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,575 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (22,669 + 0,05 + 0,056 + 0,06)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,748 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (21,695)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 10,617 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5TB1 TAMBANG

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 24 RAWMILL (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (25,846 + 0,184 + 0,161 + 0,072 + 0,105 + 0,082)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,589 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (22,720 + 0,077 + 0,066 + 0,029 + 0,044 + 0,034)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,759 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (21,695)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 10,666 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 24 RAWMILL

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 32 KILN IHC/LC2.1 (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (27,092 + 0,218 + 0,107 + 0,138 + 1,715 + 0,413 + 0,245 + 0,288 + 0,345 + 0,626)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,893 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (24,308 + 0,091 + 0,044 + 0,057 + 1,143 + 0,165 + 0,098 + 0,115 + 0,138 + 0,28)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,042 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (23,635 + 1,143)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 12,283 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 32 KILN IIIC/LC2.1

$$= \text{ , } + \text{ , } + \text{ , }$$

$$= \text{ , } /$$

BUS 33 KILN IIIB/LC2.0 (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (28,054 + 0,208 + 0,151 + 0,373 + 0,789 + 0,55 + 0,55)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,86 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (24,538 + 0,088 + 0,063 + 0,149 + 0,526 + 0,367 + 0,367)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,014 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (23,252 + 0,526 + 0,367 + 0,367)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 24,512 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 33 KILN IIIB/LC2.0

$$= \text{ , } + \text{ , } + \text{ , }$$

$$= \text{ , } /$$

Bus 6S1Q21 (FCT = 0,57)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (0,388 + 5,312 + 5,203 + 20,413)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,901 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (0,163 + 3,551 + 3,509 + 20,4)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,139 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,57 detik

$$_{0,57} = 1,39814 \times (3,437 + 3,459 + 20,395)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,57} = 22,998 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus 6S1Q21

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 158 SLC, SILICA (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (17,344 + 0,239 + 0,153)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,039 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (16,275 + 0,1 + 0,063)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,232 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (16,224)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 7,832 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 158 SLC, SILICA

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 348 RAWMILL DRIVE (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (19,812 + 0,308 + 5,359)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,527 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (18,711 + 0,134 + 3,573)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,714 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (18,594 + 3,573)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$= \quad , \quad + \quad , \quad + \quad , \\ = \quad , \quad /$$

BUS 348 RAWMILL ID FAN (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (19,863 + 5,395 + 0,128)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,521 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (18,731 + 3,597 + 0,054)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,711 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (18,581 + 3,597)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 10,918 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 348 RAWMILL ID FAN

$$= \quad , \quad + \quad , \quad + \quad , \\ = \quad , \quad /$$

Bus 6S1Q23 (FCT = 0,57)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (3,558 + 1,875 + 20,418)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,551 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (2,256 + 1,36 + 20,403)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,844 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,57 detik

$$_{0,57} = 1,39814 \times (1,999 + 1,227 + 20,399)^{1,062623} \times 0,49$$

$$_{0,57} = 19,73 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus 6S1Q23

$$= \quad , \quad + \quad , \quad + \quad , \\ = \quad , \quad /$$

BUS 548 CEMENT MILL (FCT = 0,37)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (17,637 + 0,331 + 3,066 + 0,081 + 0,19 + 0,072)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,267 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (17,315 + 0,412 + 2,044 + 0,034 + 0,08 + 0,029)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,489 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,37} = 1,39814 \times (17,233 + 2,044)^{1,062623} \times 0,29$$

$$_{0,37} = 9,407 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 548 CEMENT MILL

$$= , + , + ,$$
$$= , /$$

4.4 Hasil Simulasi Insiden Energi Arc Flash Pada Sistem Resetting Dengan Penambahan Rele Diferensial

Pada hasil perhitungan dari sistem *resetting* yang ditampilkan pada sub-bab sebelumnya, masih terdapat beberapa bus yang berada pada kategori 4. Oleh sebab itu, pada sub-bab ini akan ditampilkan hasil simulasi ketika sistem kelistrikan *resetting* dengan penambahan rele diferensial. Besarnya insiden energi *arc flash* pada tiap-tiap bus dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil simulasi insiden energi *arc flash* pada PT. Semen Padang sistem *resetting* dengan penambahan rele diferensial

BUS ID	Arus Bolted (kA)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori
Bus 5E1Q22	31,196	29,698	0,13	7,03	Level 2
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	30,193	28,759	0,13	6,79	Level 2
BUS 5W1 KILN DRV	29,452	28,065	0,13	6,62	Level 2
BUS 5W2 COOLER	29,397	28,014	0,13	6,6	Level 2
BUS 21 KILN ID FAN	30,353	28,908	0,13	6,83	Level 2
Bus 5E1Q23	31,999	30,448	0,13	7,23	Level 2

Tabel 4.3 Hasil simulasi insiden energi *arc flash* pada PT. Semen Padang sistem resetting dengan penambahan rele diferensial (lanjutan)

BUS ID	Arus Bolted (kA)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	30,93	29,449	0,13	6,97	Level 2
BUS 5TB1 TAMBANG	26,224	25,038	0,13	5,85	Level 2
BUS 24 RAWMILL	26,439	25,239	0,13	5,9	Level 2
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	31,164	29,667	0,13	7,03	Level 2
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	30,658	29,194	0,13	6,91	Level 2
Bus 6S1Q21	31,288	29,784	0,13	7,06	Level 2
BUS 158 SLC, SILICA	17,736	17,046	0,13	3,86	Level 1
BUS 348 RAWMILL DRIVE	25,384	24,249	0,13	5,65	Level 2
BUS 348 RAWMILL ID FAN	25,291	24,162	0,13	5,63	Level 2
Bus 6S1Q23	25,84	24,678	0,13	5,76	Level 2
BUS 548 CEMENT MILL	21,323	20,43	0,13	4,7	Level 2

Dari tabel diatas, dapat dilihat koordinasi waktu pemutusan CB pada masing-masing bus memiliki nilai 0,13 detik. Hal ini dikarenakan masing-masing CB pada bus akan melokalisir gangguan dengan waktu tercepat. Sebagai contoh, ketika terjadi gangguan pada Bus 5E1Q22 pada sistem *resetting*, waktu melokalisir gangguan di-*setting* 0,57 detik, hal ini akan berdampak pada besarnya insiden energi. Akan tetapi, dengan penambahan rele diferensial, waktu melokalisir gangguan menjadi 0,13 detik. Sehingga, diharapkan ketika terjadi gangguan pada bus tertentu, gangguan dilokalisir secepat mungkin oleh CB terdekatnya.

4.4.1 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Sistem Resetting Dengan Penambahan Rele Diferensial Sesuai Standar IEEE 1584-2002

Perhitungan insiden energi pada masing-masing bus sesuai dengan standar IEEE 1584-2002 telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, akan tetapi, dengan penambahan rele diferensial pada sistem *resetting*, waktu melokalisir gangguan (*Fault Clearing Time*) menjadi turun, sehingga perlu dihitung kembali nilai insiden energi sesuai standar IEEE 1584-2002 dengan persamaan (4.1) yang dapat dilihat pada perhitungan berikut:

Bus 5E1Q22

$$Ibf = 31,196 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 31,296^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN

$$Ibf = 30,193 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 30,193^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

BUS 5W1 KILN DRV

$$Ibf = 29,452 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 29,452^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

BUS 5W2 COOLER

$$Ibf = 29,397 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 29,397^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

BUS 21 KILN ID FAN

$$Ibf = 30,353 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 29,397^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

Bus 5E1Q23

$$Ibf = 31,999 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 31,999^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$$Ibf = 30,93 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 30,93^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

BUS 5TB1 TAMBANG

$$\begin{aligned}
 Ibf &= 26,224 ; t = 0,13 \\
 &= 1,39814 \times 26,224^{1,062623} \times 0,13 \\
 &= , /
 \end{aligned}$$

BUS 24 RAWMILL

$$\begin{aligned}
 Ibf &= 26,439 ; t = 0,13 \\
 &= 1,39814 \times 26,439^{1,062623} \times 0,13 \\
 &= , /
 \end{aligned}$$

BUS 32 KILN IIIC/LC2.1

$$\begin{aligned}
 Ibf &= 31,164 ; t = 0,13 \\
 &= 1,39814 \times 31,164^{1,062623} \times 0,13 \\
 &= , /
 \end{aligned}$$

BUS 33 KILN IIIB/LC2.0

$$\begin{aligned}
 Ibf &= 30,658 ; t = 0,13 \\
 &= 1,39814 \times 30,658^{1,062623} \times 0,13 \\
 &= , /
 \end{aligned}$$

Bus 6S1Q21

$$\begin{aligned}
 Ibf &= 31,288 ; t = 0,13 \\
 &= 1,39814 \times 31,288^{1,062623} \times 0,13 \\
 &= , /
 \end{aligned}$$

BUS 158 SLC, SILICA

$$\begin{aligned}
 Ibf &= 17,736 ; t = 0,13 \\
 &= 1,39814 \times 17,736^{1,062623} \times 0,13 \\
 &= , /
 \end{aligned}$$

BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$\begin{aligned}
 Ibf &= 25,384 ; t = 0,13 \\
 &= 1,39814 \times 25,384^{1,062623} \times 0,13 \\
 &= , /
 \end{aligned}$$

BUS 348 RAWMILL ID FAN

$$Ibf = 25,291 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 25,291^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

Bus 6S1Q23

$$I_{bf} = 25,84 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 25,84^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

BUS 548 CEMENT MILL

$$I_{bf} = 21,323 ; t = 0,13$$

$$= 1,39814 \times 21,323^{1,062623} \times 0,13$$

$$= , /$$

4.4.2 Perhitungan Insiden Energi Arc Flash Sistem Resetting Dengan Penambahan Rele Diferensian Menggunakan Metode Modifikasi

Sama halnya dengan perhitungan metode modifikasi pada sistem *resetting*, insiden energi *arc flash* diperoleh dengan beberapa pertimbangan, antara lain berkurangnya besar kontribusi arus hubung singkat berdasarkan periode gelombang arus hubung singkat, waktu pemutusan masing-masing *circuit breaker* yang menuju titik gangguan, dan juga kontribusi arus hubung singkat dari motor induksi berdasarkan kapasitasnya.

Dengan metode modifikasi perhitungan, kontribusi arus hubung singkat masing-masing beban akan dikelompokkan kedalam beberapa domain waktu seperti yang telah ditunjukkan dalam Tabel 2.5 Berikut perhitungan insiden energi *arc flash* pada masing-masing bus :

Bus 5E1Q22 (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (3,987 + 0,776 + 1,311 + 4,603 + 0,128 + 20,413)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,895 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (2,646 + 0,34 + 0,757 + 2,95 + 0,053 + 20,4)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,1 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (2,618 + 0,57 + 2,74 + 20,396)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,258 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus 5E1Q22

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (26,189 + 0,072 + 1,971 + 1,971)^{1,062623} \times$$

$$_{0,035}$$

$$_{0,035} = 1,83 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (23,669 + 0,029 + 1,314 + 1,314)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,033 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (22,939 + 1,314 + 1,314)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,19 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5R2 RAWMILL ID FAN

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 5W1 KILN DRV (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (28,676 + 0,087 + 0,137 + 0,562)^{1,062623} \times$$

$$_{0,035}$$

$$_{0,035} = 1,782 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (25,443 + 0,036 + 0,057 + 0,252)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,989 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (25,022)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,14 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5W1 KILN DRV

$$= , + , + ,$$
$$= , /$$

BUS 5W2 COOLER (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (28,085 + 0,155 + 0,161 + 0,161 + 0,856)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,779 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (24,974 + 0,064 + 0,066 + 0,066 + 0,571)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,985 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (24,415 + 0,571)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,137 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5W2 COOLER

$$= , + , + ,$$
$$= , /$$

BUS 21 KILN ID FAN (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (25,722 + 0,13 + 0,191 + 0,213 + 1,634 + 1,634 + 0,856)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,841 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (23,470 + 0,054 + 0,08 + 0,09 + 1,089 + 1,089 + 0,571)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,042 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (22,904 + 1,089 + 1,089 + 0,571)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,197 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 21 KILN ID FAN

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

Bus 5E1Q23 (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (3,997 + 0,401 + 0,601 + 4,053 + 2,593 + 20,413)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,949 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (2,65 + 0,166 + 0,25 + 2,116 + 1,547 + 20,4)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,099 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,57 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (2,618 + 1,142 + 1,257 + 20,397)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,176 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus 5E1Q23

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 5R1 RAWMILL ID FAN (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (26,917 + 0,083 + 1,971 + 1,971)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,877 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (23,63 + 0,034 + 1,314 + 1,314)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,03 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (22,086 + 1,314 + 1,314)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,112 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 5TB1 TAMBANG (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (25,828 + 0,122 + 0,135 + 0,145)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,575 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (22,669 + 0,05 + 0,056 + 0,06)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,748 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (21,695)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 1,83 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 5TB1 TAMBANG

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 24 RAWMILL (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (25,846 + 0,184 + 0,161 + 0,072 + 0,105 + 0,082)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,589 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (22,720 + 0,077 + 0,066 + 0,029 + 0,044 + 0,034)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,759 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (21,695)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 1,839 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 24 RAWMILL

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 32 KILN IHC/LC2.1 (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (27,092 + 0,218 + 0,107 + 0,138 + 1,715 + 0,413 + 0,245 + 0,288 + 0,345 + 0,626)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,893 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (24,308 + 0,091 + 0,044 + 0,057 + 1,143 + 0,165 + 0,098 + 0,115 + 0,138 + 0,28)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,042 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (23,635 + 1,143)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,118 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 32 KILN IIIC/LC2.1

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 33 KILN IIIB/LC2.0 (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (28,054 + 0,208 + 0,151 + 0,373 + 0,789 + 0,55 + 0,55)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,86 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (24,538 + 0,088 + 0,063 + 0,149 + 0,526 + 0,367 + 0,367)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,014 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (23,252 + 0,526 + 0,367 + 0,367)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,094 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 33 KILN IIIB/LC2.0

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

Bus 6S1Q21 (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (0,388 + 5,312 + 5,203 + 20,413)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,901 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (0,163 + 3,551 + 3,509 + 20,4)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 2,139 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (3,437 + 3,459 + 20,395)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,347 \text{ cal/cm}^2$$

Total Isiden Energi Bus 6S1Q21

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 158 SLC, SILICA (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (17,344 + 0,239 + 0,153)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,039 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (16,275 + 0,1 + 0,063)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,232 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,37 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (16,224)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 1,35 \text{ cal/cm}^2$$

Total Isiden Energi BUS 158 SLC, SILICA

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 348 RAWMILL DRIVE (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (19,812 + 0,308 + 5,359)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,527 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (18,711 + 0,134 + 3,573)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,714 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (18,594 + 3,573)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 1,881 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 348 RAWMILL ID FAN (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (19,863 + 5,395 + 0,128)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,521 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (18,731 + 3,597 + 0,054)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,711 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (18,581 + 3,597)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 1,882 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 348 RAWMILL ID FAN

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

Bus 6S1Q23 (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (3,558 + 1,875 + 20,418)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,551 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (2,256 + 1,36 + 20,403)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,844 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (1,999 + 1,227 + 20,399)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 2,013 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi Bus 6S1Q23

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

BUS 548 CEMENT MILL (FCT = 0,13)

Domain waktu 0 – 0,035 detik

$$_{0,035} = 1,39814 \times (17,637 + 0,331 + 3,066 + 0,081 + 0,19 + 0,072)^{1,062623} \times 0,035$$

$$_{0,035} = 1,267 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,035 – 0,08 detik

$$_{0,08} = 1,39814 \times (17,315 + 0,412 + 2,044 + 0,034 + 0,08 + 0,029)^{1,062623} \times 0,045$$

$$_{0,08} = 1,489 \text{ cal/cm}^2$$

Domain waktu 0,08 – 0,13 detik

$$_{0,13} = 1,39814 \times (17,233 + 2,044)^{1,062623} \times 0,05$$

$$_{0,13} = 1,622 \text{ cal/cm}^2$$

Total Insiden Energi BUS 548 CEMENT MILL

$$= , + , + ,$$

$$= , /$$

4.5 Perhitungan FPB Berdasarkan Hasil Perhitungan Insiden Energi Arc Flash

Hasil perhitungan insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode modifikasi maupun standar IEEE 1584-2002 sistem kelistrikan PT. Semen Padang setelah dilakukan *resetting*, akan digunakan untuk memperoleh jarak aman bagi pekerja dari titik potensi bahaya *arc flash*. Hasil perhitungan jarak aman ini nantinya digunakan sebagai acuan bagi pekerja untuk menentukan titik aman serta perlengkapan pelindung diri yang dibutuhkan saat bekerja.

Adapun penyederhanaan rumusnya untuk kategori tegangan 1-15 kV yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$D_B = \left[4,184 \frac{E}{E_B} D^x \right]^{\frac{1}{x}} \dots\dots\dots (4.2)$$

dengan :

E	Insiden Energi (cal/cm ²)
E_B	Insiden energi dalam J/cm ² pada jarak batasan. Dapat di set pada nilai 5.0 J/cm ²
D	Jarak dari titik <i>arc</i> ke pekerja (mm). Untuk sistem 6,3 kV, digunakan 910 mm.
x	Eksponen jarak. Untuk sistem 6,3 kV, digunakan 0,973.

4.5.1 Perhitungan FPB Sesuai Standar IEEE 1584-2002 Sistem *Resetting* Dan Sistem *Resetting* Dengan Penambahan Rele Diferensial

Pada sub-bab ini akan dibahas perhitungan *flash protection boundary* dari hasil perhitungan insiden energi *arc flash* sesuai dengan standar IEEE 1584-2002. Perhitungan dilakukan pada tiap-tiap bus dari sistem kelistrikan PT. Semen Padang setelah dilakukan *resetting*. Berikut ini adalah perhitungan untuk tiap-tiap bus tersebut.

Bus 5E1Q22

$$E = 30,838$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{30,838}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 25699,41 \text{ mm} = 25,699 \text{ m}$$

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN

$$E = 19,335$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{19,335}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 15905,79 \text{ mm} = 15,906 \text{ m}$$

BUS 5W1 KILN DRV

$$E = 18,831$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{18,831}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 15479,82 \text{ mm} = 15,48 \text{ m}$$

BUS 5W2 COOLER

$$E = 18,793$$

$$= [4,184 \cdot \frac{18,793}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 15447,72 \text{ mm} = 15,448 \text{ m}$$

BUS 21 KILN ID FAN

$$E = 19,443$$

$$= [4,184 \cdot \frac{19,443}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 15997,10 \text{ mm} = 15,997 \text{ m}$$

Bus 5E1Q23

$$E = 31,682$$

$$= [4,184 \cdot \frac{31,682}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 26422,56 \text{ mm} = 26,423 \text{ m}$$

BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$$E = 19,836$$

$$= [4,184 \cdot \frac{19,836}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 16329,52 \text{ mm} = 16,33 \text{ m}$$

BUS 5TBI TAMBANG

$$E = 16,645$$

$$= [4,184 \cdot \frac{16,645}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 13636,07 \text{ mm} = 13,636 \text{ m}$$

BUS 24 RAWMILL

$$E = 16,79$$

$$= [4,184 \cdot \frac{16,79}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 13758,17 \text{ mm} = 13,758 \text{ m}$$

BUS 32 KILN IIIC/LC2.1

$$E = 19,996$$

$$= [4,184 \cdot \frac{19,996}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 16464,90 \text{ mm} = 16,465 \text{ m}$$

BUS 33 KILN IIIB/LC2.0

$$E = 19,651$$

$$= [4,184 \cdot \frac{19,651}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 16173,01 \text{ mm} = 16,173 \text{ m}$$

Bus 6S1Q21

$$E = 30,935$$

$$= [4,184 \cdot \frac{30,935}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 25782,49 \text{ mm} = 25,782 \text{ m}$$

BUS 158 SLC, SILICA

$$E = 10,985$$

$$= [4,184 \cdot \frac{10,985}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 8896,05 \text{ mm} = 8,896 \text{ m}$$

BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$E = 16,079$$

$$= [4,184 \cdot \frac{16,079}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 13159,75 \text{ mm} = 13,16 \text{ m}$$

BUS 348 RAWMILL ID FAN

$$E = 16,017$$

$$= [4,184 \cdot \frac{16,017}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 13107,6 \text{ mm} = 13,108 \text{ m}$$

Bus 6S1Q23

$$E = 25,244$$

$$= [4,184 \cdot \frac{25,244}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 20921,02 \text{ mm} = 20,921 \text{ m}$$

BUS 548 CEMENT MILL

$$E = 13,36$$

$$= [4,184 \cdot \frac{13,36}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 10878,34 \text{ mm} = 10,878 \text{ m}$$

Sedangkan perhitungan FPB pada sistem *resetting* dengan penambahan rele diferensial sesuai standar IEEE 1584-20002 dapat dilihat pada perhitungan berikut:

Bus 5E1Q22

$$E = 7,033$$

$$= [4,184 \cdot \frac{7,033}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5625,54 \text{ mm} = 5,626 \text{ m}$$

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN

$$E = 6,793$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,793}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5428,33 \text{ mm} = 5,428 \text{ m}$$

BUS 5W1 KILN DRV

$$E = 6,616$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,616}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5283,02 \text{ mm} = 5,283 \text{ m}$$

BUS 5W2 COOLER

$$E = 6,603$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,603}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5272,35 \text{ mm} = 5,272 \text{ m}$$

BUS 21 KILN ID FAN

$$E = 6,832$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,832}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5460,37 \text{ mm} = 5,460 \text{ m}$$

Bus 5E1Q23

$$E = 7,226$$

$$= [4,184 \cdot \frac{7,226}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5784,26 \text{ mm} = 5,784 \text{ m}$$

BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$$E = 6,97$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,97}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5573,75 \text{ mm} = 5,574 \text{ m}$$

BUS 5TB1 TAMBANG

$$E = 5,848$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,848}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4653,79 \text{ mm} = 4,654 \text{ m}$$

BUS 24 RAWMILL

$$E = 5,899$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,899}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4695,51 \text{ mm} = 4,696 \text{ m}$$

BUS 32 KILN IIIC/LC2.1

$$E = 7,026$$

$$= [4,184 \cdot \frac{7,026}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5619,78 \text{ mm} = 5,62 \text{ m}$$

BUS 33 KILN IIB/LC2.0

$$E = 6,904$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,904}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5519,52 \text{ mm} = 5,520 \text{ m}$$

Bus 6S1Q21

$$E = 7,055$$

$$= [4,184 \cdot \frac{7,055}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5643,62 \text{ mm} = 5,644 \text{ m}$$

BUS 158 SLC, SILICA

$$E = 3,86$$

$$= [4,184 \cdot \frac{3,86}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 3036,55 \text{ mm} = 3,037 \text{ m}$$

BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$E = 5,65$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,65}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4491,93 \text{ mm} = 4,492 \text{ m}$$

BUS 348 RAWMILL ID FAN

$$E = 5,628$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,628}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4473,96 \text{ mm} = 4,474 \text{ m}$$

Bus 6S1Q23

$$E = 5,757$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,757}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4579,38 \text{ mm} = 4,579 \text{ m}$$

BUS 548 CEMENT MILL

$$E = 4,694$$

$$\begin{aligned} &= \left[4,184 \cdot \frac{4,694}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 3712,73 \text{ mm} = 3,713 \text{ m} \end{aligned}$$

4.5.2 Perhitungan FPB Dengan Metode Modifikasi Sistem *Resetting* Dan Sistem *Resetting* Dengan Penambahan Rele Diferensial

Pada sub-bab sebelumnya telah diperhitungkan jarak aman pekerja dari titik potensi bahaya *arc flash* dengan menggunakan standar IEEE-1584-2002 pada sistem resetting dan sistem resetting dengan penambahan rele diferensial. Pada sub-bab ini, dengan menggunakan persamaan yang sama yakni persamaan (4.2) perhitungan dilakukan dimana nilai insiden energi diperoleh dengan menggunakan perhitungan metode modifikasi pada kedua sistem tersebut.

Perhitungan FPB dilakukan pada tiap-tiap bus dari sistem kelistrikan PT. Semen Padang setelah dilakukan *resetting*. Berikut ini adalah perhitungan untuk tiap-tiap bus tersebut.

Bus 5E1Q22

$$E = 26,128$$

$$\begin{aligned} &= \left[4,184 \cdot \frac{26,128}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 21674,33 \text{ mm} = 21,674 \text{ m} \end{aligned}$$

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN

$$E = 16,562$$

$$\begin{aligned} &= \left[4,184 \cdot \frac{16,562}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 13566,2 \text{ mm} = 13,566 \text{ m} \end{aligned}$$

BUS 5W1 KILN DRV

$$E = 16,183$$

$$\begin{aligned} &= \left[4,184 \cdot \frac{16,183}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 13247,24 \text{ mm} = 13,247 \text{ m} \end{aligned}$$

BUS 5W2 COOLER

$$E = 16,157$$

$$\begin{aligned} &= [4,184 \cdot \frac{16,157}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 13225,37 \text{ mm} = 13,225 \text{ m} \end{aligned}$$

BUS 21 KILN ID FAN

$$E = 16,628$$

$$\begin{aligned} &= [4,184 \cdot \frac{16,628}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 13621,76 \text{ mm} = 13,622 \text{ m} \end{aligned}$$

Bus 5E1Q23

$$E = 25,369$$

$$\begin{aligned} &= [4,184 \cdot \frac{25,369}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 21027,5 \text{ mm} = 21,027 \text{ m} \end{aligned}$$

BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$$E = 16,157$$

$$\begin{aligned} &= [4,184 \cdot \frac{16,157}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 13225,37 \text{ mm} = 13,225 \text{ m} \end{aligned}$$

BUS 5TBI TAMBANG

$$E = 13,939$$

$$\begin{aligned} &= [4,184 \cdot \frac{13,939}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 11363,16 \text{ mm} = 11,363 \text{ m} \end{aligned}$$

BUS 24 RAWMILL

$$E = 14,013$$

$$\begin{aligned} &= [4,184 \cdot \frac{14,013}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 11425,16 \text{ mm} = 11,425 \text{ m} \end{aligned}$$

BUS 32 KILN IIIC/LC2.1

$$E = 16,218$$

$$= [4,184 \cdot \frac{16,218}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 13276,69 \text{ mm} = 13,277 \text{ m}$$

BUS 33 KILN IIIB/LC2.0

$$E = 16,017$$

$$= [4,184 \cdot \frac{16,017}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 13107,69 \text{ mm} = 13,108 \text{ m}$$

Bus 6S1Q21

$$E = 27,039$$

$$= [4,184 \cdot \frac{27,039}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 22451,38 \text{ mm} = 22,451 \text{ m}$$

BUS 158 SLC, SILICA

$$E = 10,104$$

$$= [4,184 \cdot \frac{10,104}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 8163,63 \text{ mm} = 8,164 \text{ m}$$

BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$E = 14,153$$

$$= [4,184 \cdot \frac{14,153}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 11542,49 \text{ mm} = 11,542 \text{ m}$$

BUS 348 RAWMILL ID FAN

$$E = 14,150$$

$$= [4,184 \cdot \frac{14,150}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 11539,98 \text{ mm} = 11,54 \text{ m}$$

Bus 6S1Q23

$$E = 23,125$$

$$= [4,184 \cdot \frac{23,125}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 19118,32 \text{ mm} = 19,118 \text{ m}$$

BUS 548 CEMENT MILL

$$E = 12,164$$

$$= [4,184 \cdot \frac{12,164}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 9878,76 \text{ mm} = 9,879 \text{ m}$$

Sedangkan untuk perhitungan pada sistem *restting* dengan penambahan rele diferensial dapat dilihat pada perhitungan berikut:

Bus 5E1Q22

$$E = 6,254$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,254}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4986,16 \text{ mm} = 4,986 \text{ m}$$

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN

$$E = 6,052$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,052}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4820,72 \text{ mm} = 4,821 \text{ m}$$

BUS 5W1 KILN DRV

$$E = 5,911$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,911}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4705,33 \text{ mm} = 4,705 \text{ m}$$

BUS 5W2 COOLER

$$E = 5,901$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,901}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4697,15 \text{ mm} = 4,697 \text{ m}$$

BUS 21 KILN ID FAN

$$E = 6,081$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{6,081}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4844,46 \text{ mm} = 4,844 \text{ m}$$

Bus 5E1Q23

$$E = 6,224$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{6,224}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4961,58 \text{ mm} = 4,962 \text{ m}$$

BUS 5R1 RAWMILL ID FAN

$$E = 6,019$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{6,019}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4793,71 \text{ mm} = 4,794 \text{ m}$$

BUS 5TB1 TAMBANG

$$E = 5,153$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{5,153}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4086,35 \text{ mm} = 4,086 \text{ m}$$

BUS 24 RAWMILL

$$E = 5,187$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{5,187}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4114,06 \text{ mm} = 4,114 \text{ m}$$

BUS 32 KILN IIIC/LC2.1

$$E = 6,053$$

$$= \left[4,184 \cdot \frac{6,053}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4821,54 \text{ mm} = 4,822 \text{ m}$$

BUS 33 KILN IIB/LC2.0

$$E = 5,968$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,968}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4751,97 \text{ mm} = 4,752 \text{ m}$$

Bus 6S1Q21

$$E = 6,387$$

$$= [4,184 \cdot \frac{6,387}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5095,18 \text{ mm} = 5,095 \text{ m}$$

BUS 158 SLC, SILICA

$$E = 3,622$$

$$= [4,184 \cdot \frac{3,622}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 2844,30 \text{ mm} = 2,844 \text{ m}$$

BUS 348 RAWMILL DRIVE

$$E = 5,122$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,122}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4061,08 \text{ mm} = 4,061 \text{ m}$$

BUS 348 RAWMILL ID FAN

$$E = 5,114$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,114}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4054,56 \text{ mm} = 4,055 \text{ m}$$

Bus 6S1Q23

$$E = 5,408$$

$$= [4,184 \cdot \frac{5,408}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 4294,31 \text{ mm} = 4,294 \text{ m}$$

BUS 548 CEMENT MILL

$$E = 4,378$$

$$= [4,184 \cdot \frac{4,378}{5} \cdot 910^{0,973}]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 3456,10 \text{ mm} = 3,456 \text{ m}$$

4.6 Perbandingan Besar Energi Arc Flash Sistem Resetting Dan Sistem Resetting Penambahan Rele Diferensial (Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi)

Setelah pada beberapa sub-bab sebelumnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi pada sistem *resetting*, perbedaan insiden energi *arc flash* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbandingan perhitungan besar insiden energi *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dengan *modified* pada sistem *resetting*

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Standard</i>	Kategori	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Modified</i>	Kategori
Bus 5E1Q22	30,838	Level 4	26,128	Level 4
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	19,335	Level 3	16,562	Level 3
BUS 5W1 KILN DRV	18,831	Level 3	16,183	Level 3
BUS 5W2 COOLER	18,793	Level 3	16,157	Level 3
BUS 21 KILN ID FAN	19,443	Level 3	16,628	Level 3
Bus 5E1Q23	31,682	Level 4	25,369	Level 4
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	19,836	Level 3	16,157	Level 3
BUS 5TB1 TAMBANG	16,645	Level 3	13,939	Level 3
BUS 24 RAWMILL	16,79	Level 3	14,013	Level 3
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	19,996	Level 3	16,218	Level 3
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	19,651	Level 3	16,017	Level 3
Bus 6S1Q21	30,935	Level 4	27,039	Level 4
BUS 158 SLC, SILICA	10,985	Level 3	10,104	Level 3
BUS 348 RAWMILL DRIVE	16,079	Level 3	14,153	Level 3
BUS 348 RAWMILL ID FAN	16,017	Level 3	14,150	Level 3
Bus 6S1Q23	25,244	Level 4	23,125	Level 3
BUS 548 CEMENT MILL	13,36	Level 3	12,164	Level 3

Dari tabel tersebut, ditampilkan data besar insiden energi *arc flash* setelah *resetting* untuk perhitungan dengan standar IEEE 1584-2002

dibandingkan dengan perhitungan dengan metode modifikasi. Tabel tersebut menunjukkan bahwa insiden energi *arc flash* dengan metode modifikasi perhitungan lebih kecil dari pada standard IEEE 1584-2002. Hal ini dikarenakan dalam metode modifikasi, dipertimbangkan berkurangnya arus kontribusi hubung singkat menurut periode waktu hubung singkat. Selain itu juga dipertimbangkan pula waktu pemutusan *circuit breaker* dari masing-masing sumber yang berkontribusi menuju titik gangguan, dan untuk periode *steady state*, kontribusi dari motor juga dihilangkan, sehingga metode modifikasi menghasilkan insiden energi *arc flash* yang lebih kecil. Sedangkan dalam perhitungan standard IEEE 1584-2002, tidak dipertimbangkan hal-hal tersebut, demikian juga dalam penentuan waktu pemutusan CB sebagai nilai FCT (*Fault Clearing Time*), yaitu dipilih waktu pemutusan yang terlama. Dengan penjelasan seperti diatas, metode modifikasi lebih akurat dalam menentukan besarnya insiden energi yang ada.

Sama halnya pada sistem *resetting* dengan penambahan rele diferensial, dengan menggunakan perhitungan metode modifikasi diperoleh nilai insiden energi lebih kecil dibandingkan dengan perhitungan standar IEEE 1584-2002. Untuk lebih jelas, perbandingan perhitungan menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi pada sistem *resetting* penambahan rele diferensial dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Perbandingan perhitungan besar insiden energi *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dengan modified pada sistem *resetting* penambahan rele diferensial

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²) Standard	Kategori	Insiden Energi (cal/cm ²) Modified	Kategori
Bus 5E1Q22	7,033	Level 2	6,254	Level 2
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	6,793	Level 2	6,052	Level 2
BUS 5W1 KILN DRV	6,616	Level 2	5,911	Level 2
BUS 5W2 COOLER	6,603	Level 2	5,901	Level 2
BUS 21 KILN ID FAN	6,832	Level 2	6,081	Level 2
Bus 5E1Q23	7,226	Level 2	6,224	Level 2

Tabel 4.5 Perbandingan perhitungan besar insiden energi *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dengan modified pada sistem *resetting* penambahan rele diferensial (lanjutan)

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Standard</i>	Kategori	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Modified</i>	Kategori
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	6,970	Level 2	6,019	Level 2
BUS 5TB1 TAMBANG	5,848	Level 2	5,153	Level 2
BUS 24 RAWMILL	5,899	Level 2	5,187	Level 2
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	7,026	Level 2	6,053	Level 2
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	6,904	Level 2	5,968	Level 2
Bus 6S1Q21	7,055	Level 2	6,387	Level 2
BUS 158 SLC, SILICA	3,860	Level 1	3,622	Level 1
BUS 348 RAWMILL DRIVE	5,650	Level 2	5,122	Level 2
BUS 348 RAWMILL ID FAN	5,628	Level 2	5,114	Level 2
Bus 6S1Q23	5,757	Level 2	5,408	Level 2
BUS 548 CEMENT MILL	4,694	Level 2	4,378	Level 2

4.7 Perbandingan FPB Dan *Personal Protective Equipment* (PPE) Yang Harus Digunakan

Hasil perhitungan FPB (*flash protection boundary*) dengan metode modifikasi pada sistem *resetting* kelistrikan PT. Semen Padang lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002. Dengan kata lain, jarak aman pekerja dari titik bahaya *arc flash* dengan menggunakan metode modifikasi memiliki jarak yang lebih dekat. walaupun tetap tetap harus menggunakan PPE yang telah ditetapkan yang akan dijabarkan pada pembahasan berikutnya. Perbandingan FPB perhitungan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perbandingan FPB berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi sistem *resetting*

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Standard</i>	FPB (m)	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Modified</i>	FPB (m)
Bus 5E1Q22	30,838	25,699	26,128	21,674
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	19,335	15,906	16,562	13,566

Tabel 4.6 Perbandingan FPB berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi sistem *resetting* (lanjutan)

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Standard</i>	FPB (m)	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Modified</i>	FPB (m)
BUS 5W1 KILN DRV	18,831	15,480	16,183	13,247
BUS 5W2 COOLER	18,793	15,448	16,157	13,225
BUS 21 KILN ID FAN	19,443	15,997	16,628	13,622
Bus 5E1Q23	31,682	26,423	25,369	21,027
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	19,836	16,330	16,157	13,225
BUS 5TB1 TAMBANG	16,645	13,636	13,939	11,363
BUS 24 RAWMILL	16,79	13,758	14,013	11,425
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	19,996	16,465	16,218	13,277
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	19,651	16,173	16,017	13,108
Bus 6S1Q21	30,935	25,782	27,039	22,451
BUS 158 SLC, SILICA	10,985	8,896	10,104	8,164
BUS 348 RAWMILL DRIVE	16,079	13,160	14,153	11,542
BUS 348 RAWMILL ID FAN	16,017	13,108	14,150	11,540
Bus 6S1Q23	25,244	20,921	23,125	19,118
BUS 548 CEMENT MILL	13,36	10,878	12,164	9,879

Sedangkan untuk sistem *restting* penambahan rele diferensial dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Perbandingan FPB berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi sistem *resetting* penambahan rele diferensial

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Standard</i>	FPB (m)	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Modified</i>	FPB (m)
Bus 5E1Q22	7,033	21,674	6,254	4,986
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	6,793	13,566	6,052	4,821
BUS 5W1 KILN DRV	6,616	13,247	5,911	4,705

Tabel 4.7 Perbandingan FPB berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan metode modifikasi sistem *resetting* penambahan rele diferensial (lanjutan)

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Standard</i>	FPB (m)	Insiden Energi (cal/cm ²) <i>Modified</i>	FPB (m)
BUS 5W2 COOLER	6,603	13,225	5,901	4,697
BUS 21 KILN ID FAN	6,832	13,622	6,081	4,844
Bus 5E1Q23	7,226	21,027	6,224	4,962
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	6,970	13,225	6,019	4,794
BUS 5TB1 TAMBANG	5,848	11,363	5,153	4,086
BUS 24 RAWMILL	5,899	11,425	5,187	4,114
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	7,026	13,277	6,053	4,822
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	6,904	13,108	5,968	4,752
Bus 6S1Q21	7,055	22,451	6,387	5,095
BUS 158 SLC, SILICA	3,860	8,164	3,622	2,844
BUS 348 RAWMILL DRIVE	5,650	11,542	5,122	4,061
BUS 348 RAWMILL ID FAN	5,628	11,540	5,114	4,055
Bus 6S1Q23	5,757	19,118	5,408	4,294
BUS 548 CEMENT MILL	4,694	9,879	4,378	3,456

Personal Protective Equipment (PPE) merupakan alat perlindungan diri yang harus digunakan ketika melakukan suatu pekerjaan di daerah yang beresiko akan bahaya *arc flash*. Dari hasil perhitungan insiden energi sesuai standar IEEE 1548-2002 dan metode modifikasi sistem setelah *resetting*, Bus 6S1Q23 mengalami penurunan nilai insiden energi *arc flash* yang cukup signifikan yang mengakibatkan pengelompokan kategori (lihat Tabel 2.5) menjadi pada kategori 3 dari sebelumnya kategori 4. Hal ini berdampak pula terhadap jenis PPE yang harus digunakan. Sedangkan untuk bus lainnya juga mengalami penurunan nilai insiden energi *arc flash*, akan tetapi pengelompokan kategori tidak mengalami perubahan.

Jenis PPE yang harus digunakan berdasarkan kategori bahaya *arc flash* berdasarkan perhitungan standar IEEE 1584-2002 dapat dilihat pada Tabel 4.8

Tabel 4.8 Jenis PPE berdasarkan kategori bahaya *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 setelah *resetting*

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori	Jenis PPE
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	19,335	Kategori 3	Pakaian lengan panjang tahan api Celana panjang tahan api Jaket dan celana untuk <i>arc flash</i> sesuai kategori Helm pengaman sesuai kategori Kacamata <i>safety</i> Pelindung telinga Sarung tangan kulit Sepatu <i>safety</i> khusus
BUS 5W1 KILN DRV	18,831		
BUS 5W2 COOLER	18,793		
BUS 21 KILN ID FAN	19,443		
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	19,836		
BUS 5TB1 TAMBANG	16,645		
BUS 24 RAWMILL	16,79		
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	19,996		
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	19,651		
BUS 158 SLC, SILICA	10,985		
BUS 348 RAWMILL DRIVE	16,079		
BUS 348 RAWMILL ID FAN	16,017	Kategori 4	Pakaian lengan panjang tahan api Celana panjang tahan api Jaket untuk <i>arc flash</i> (dua lapis atau lebih) Helm pengaman sesuai kategori Kacamata <i>safety</i> Pelindung telinga Sarung tangan kulit Sepatu <i>safety</i> khusus
BUS 548 CEMENT MILL	13,36		
Bus 5E1Q22	30,838		
Bus 5E1Q23	31,682		
Bus 6S1Q21	30,935		
Bus 6S1Q23	25,244		

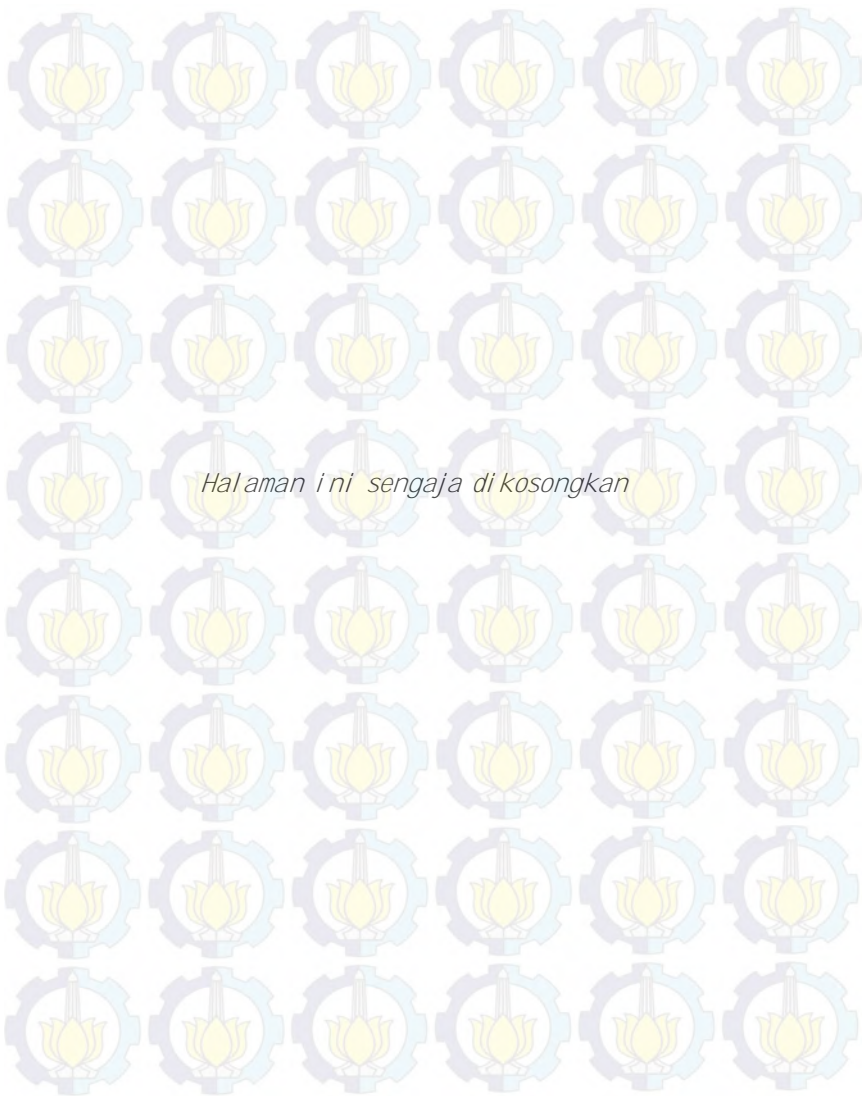
Sedangkan jenis PPE berdasarkan kategori bahaya *arc flash* berdasarkan perhitungan metode modifikasi pada sistem kelistrikan PT. Semen Padang setelah dilakukan *resetting* dan sistem *resetting* penambahan rele diferensial dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10.

Tabel 4.9 Jenis PPE berdasarkan kategori bahaya *arc flash* berdasarkan perhitungan metode modifikasi sistem *resetting*

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori	Jenis PPE
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	16,562	Kategori 3	Pakaian lengan panjang tahan api Celana panjang tahan api Jaket dan celana untuk <i>arc flash</i> sesuai kategori Helm pengaman sesuai kategori Kacamata <i>safety</i> Pelindung telinga Sarung tangan kulit Sepatu <i>safety</i> khusus
BUS 5W1 KILN DRV	16,183		
BUS 5W2 COOLER	16,157		
BUS 21 KILN ID FAN	16,628		
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	16,157		
BUS 5TB1 TAMBANG	13,939		
BUS 24 RAWMILL	14,013		
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	16,218		
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	16,017		
BUS 158 SLC, SILICA	10,104		
BUS 348 RAWMILL DRIVE	14,153		
BUS 348 RAWMILL ID FAN	14,15		
Bus 6S1Q23	23,125	Kategori 4	Pakaian lengan panjang tahan api Celana panjang tahan api Jaket untuk <i>arc flash</i> (dua lapis atau lebih) Helm pengaman sesuai kategori Kacamata <i>safety</i> Pelindung telinga Sarung tangan kulit Sepatu <i>safety</i> khusus
BUS 548 CEMENT MILL	12,164		
Bus 5E1Q22	26,128		
Bus 5E1Q23	25,369		
Bus 6S1Q21	27,039		

Tabel 4.10 Jenis PPE berdasarkan kategori bahaya *arc flash* berdasarkan perhitungan metode modifikasi sistem *resetting* penambahan rele diferensial

BUS ID	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori	Jenis PPE
BUS 158 SLC, SILICA	3,622	Level 1	Pakaian Tahan Api Pelindung Mata Pelindung Telinga Celana Panjang
BUS 548 CEMENT MILL	4,378	Level 2	Pelindung Wajah dan Kepala Pakaian Tahan Api Pelindung Mata Pelindung Telinga Celana Panjang
BUS 348 RAWMILL ID FAN	5,114	Level 2	
BUS 348 RAWMILL DRIVE	5,122	Level 2	
BUS 5TB1 TAMBANG	5,153	Level 2	
BUS 24 RAWMILL	5,187	Level 2	
Bus 6S1Q23	5,408	Level 2	
BUS 5W2 COOLER	5,901	Level 2	
BUS 5W1 KILN DRV	5,911	Level 2	
BUS 33 KILN IIIB/LC2.0	5,968	Level 2	
BUS 5R1 RAWMILL ID FAN	6,019	Level 2	
BUS 5R2 RAWMILL ID FAN	6,052	Level 2	
BUS 32 KILN IIIC/LC2.1	6,053	Level 2	
BUS 21 KILN ID FAN	6,081	Level 2	
Bus 5E1Q23	6,224	Level 2	
Bus 5E1Q22	6,254	Level 2	
Bus 6S1Q21	6,387	Level 2	



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi besar insiden busur api dan koordinasi rele pengaman pada PT. Semen Padang yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Koordinasi proteksi pada sistem kelistrikan di PT. Semen Padang memiliki sistem koordinasi yang kurang tepat, terdapat *delay* waktu yang melebihi *gradding time*, serta beberapa kurva rele pengaman memotong kurva beban seperti kurva rele RL-21DIST02-DT yang memotong arus pengisian (*inrush current*) pada trafo TR. 21DIST02-DT maupun kurva rele RL-5R1M01-RMF yang memotong arus *starting* (*lock rotor current*) motor 5R1M01-RMF. Hal ini mengakibatkan sistem bekerja secara tidak sempurna. Sehingga diperlukan koordinasi ulang pada sistem koordinasi proteksi di sistem kelistrikan PT. Semen Padang.
2. Perhitungan insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode modifikasi, perhitungan lebih akurat dalam merepresentasikan insiden energi yang sebenarnya. Hal ini karena metode modifikasi mempertimbangkan berkurangnya kontribusi arus hubung singkat berdasarkan periode waktu hubung singkat, dan mempertimbangkan waktu putusnya masing-masing *circuit breaker* untuk melokalisir gangguan. Sehingga hasil perhitungan metode modifikasi lebih kecil dari pada perhitungan dengan standard IEEE 1584-2002. Sebagai contoh insiden energi pada Bus 5E1Q22 dengan perhitungan standar IEEE1584-2002 adalah 30,838 cal/cm² sedangkan dengan metode modifikasi adalah 26,128 cal/cm².
3. Hasil perhitungan insiden energi *arc flash* saat kondisi *resetting* masih berbahaya terutama pada bus utama Bus 5E1Q22, Bus 5E1Q23, Bus 6S1Q21, dan Bus 6S1Q23 yang berada pada kategori 4. Sehingga dilakukan studi penambahan rele diferensial pada sistem proteksi sebagai pengaman utama. Hasil perhitungan insiden energi dari penambahan rele diferensial diperoleh nilai insiden energi menurun menjadi kategori 2. Hal ini dikarenakan ketika terjadi gangguan pada salah satu dari keempat bus tersebut, rele diferensial

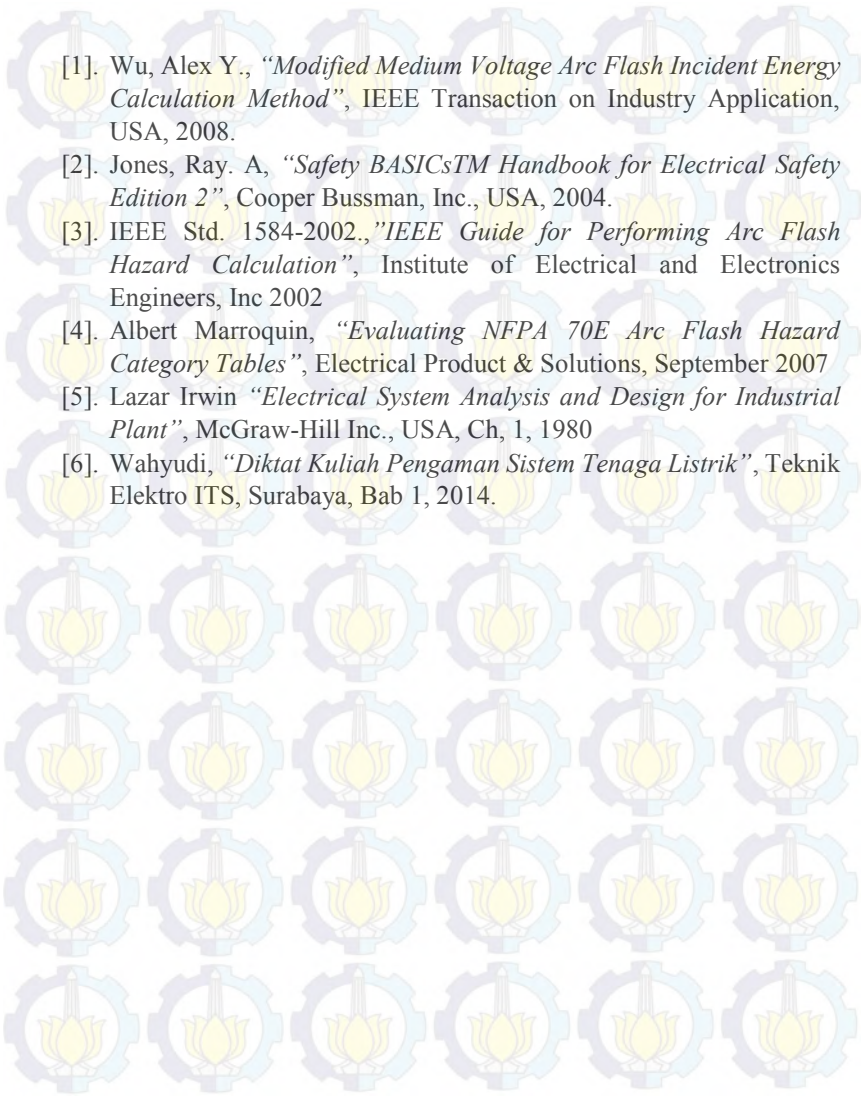
bekerja sebagai pengaman utama dengan waktu yang sangat cepat, sedangkan rele arus lebih sebagai *back up*.

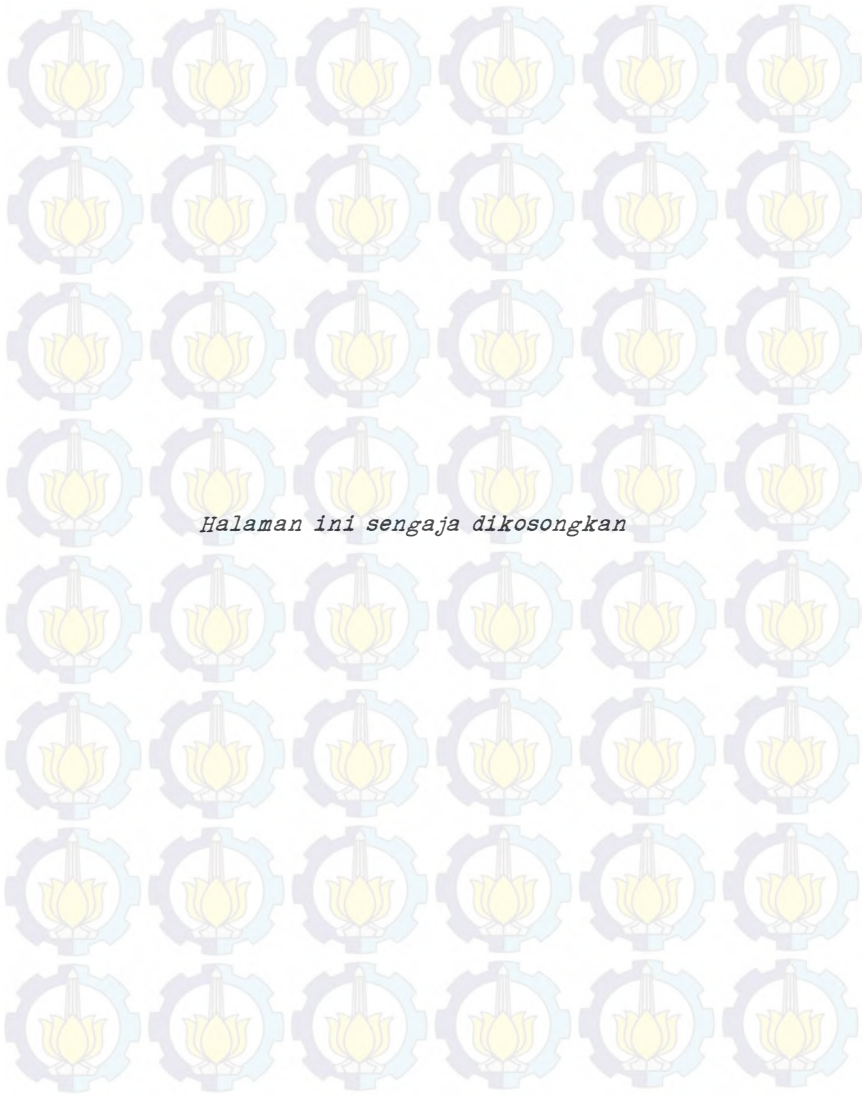
5.2 Saran

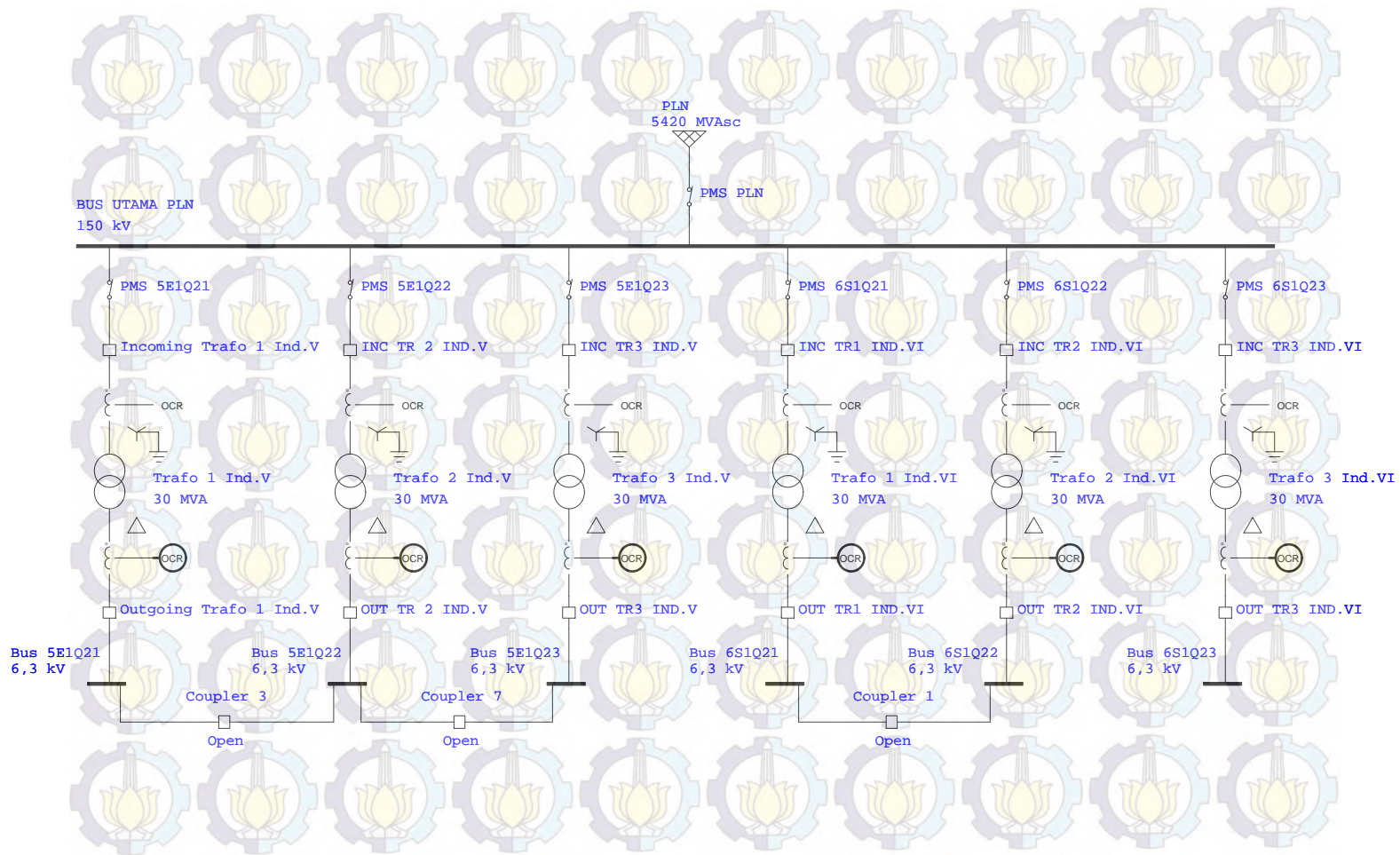
Dengan mempertimbangkan hasil studi yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, ada beberapa saran yang dapat menjadi masukan untuk kedepannya, yaitu sebagai berikut :

1. Pada *resetting* rele baru yang terdapat pada tugas akhir ini, dapat dijadikan pertimbangan dan referensi untuk melakukan *setting* yang sebenarnya.
2. Untuk memperkecil nilai insiden busur api yang ditimbulkan perlu diaplikasikan differential bus pada bus bar utama tegangan menengah 6,3 kV di PT. Semen Padang.

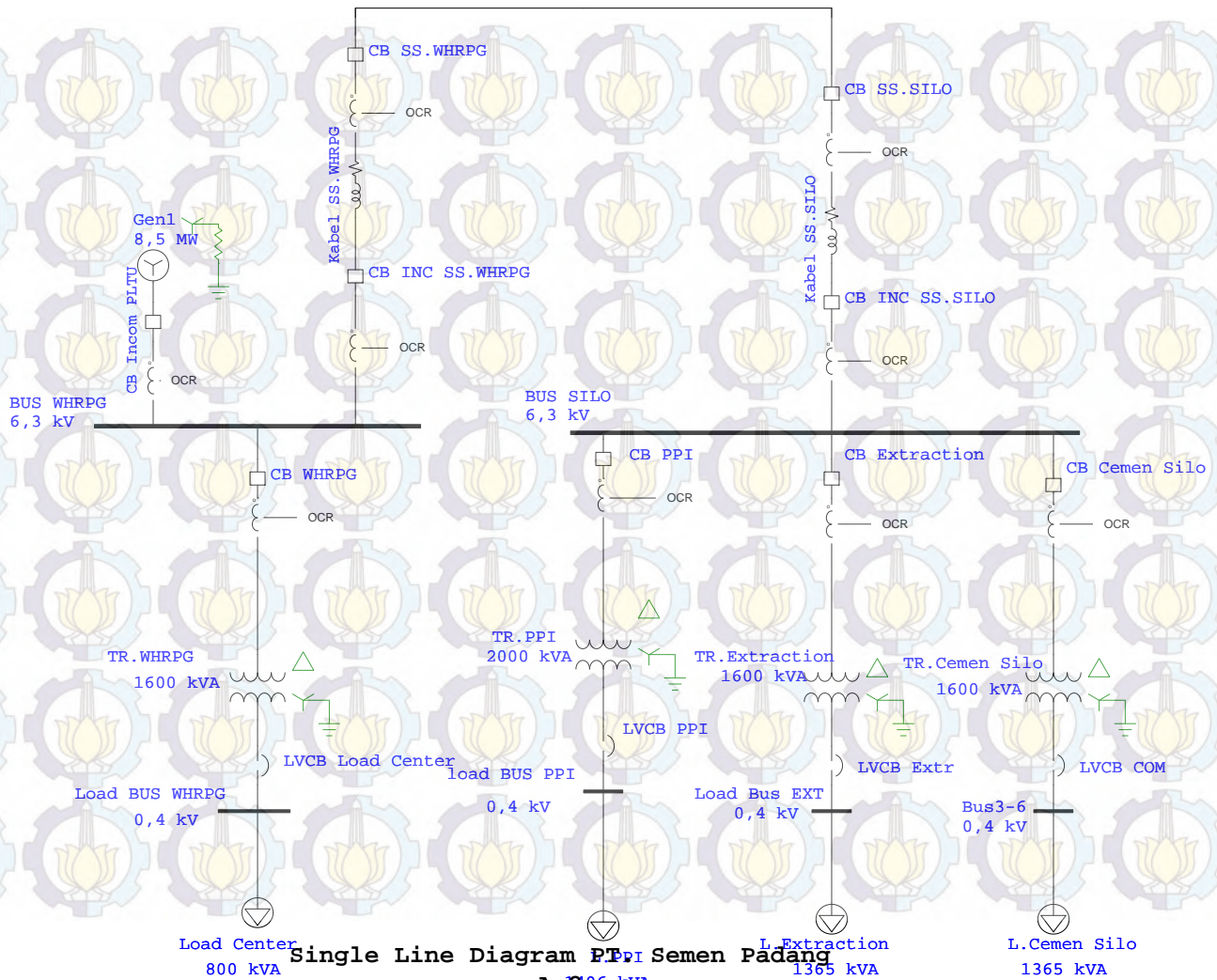
DAFTAR PUSTAKA

- 
- [1]. Wu, Alex Y., “*Modified Medium Voltage Arc Flash Incident Energy Calculation Method*”, IEEE Transaction on Industry Application, USA, 2008.
 - [2]. Jones, Ray. A, “*Safety BASICs™ Handbook for Electrical Safety Edition 2*”, Cooper Bussman, Inc., USA, 2004.
 - [3]. IEEE Std. 1584-2002., “*IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculation*”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc 2002
 - [4]. Albert Marroquin, “*Evaluating NFPA 70E Arc Flash Hazard Category Tables*”, Electrical Product & Solutions, September 2007
 - [5]. Lazar Irwin “*Electrical System Analysis and Design for Industrial Plant*”, McGraw-Hill Inc., USA, Ch, 1, 1980
 - [6]. Wahyudi, “*Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 1, 2014.





Single Line Diagram PT. Semen Padang



Load Center
800 kVA

Single Line Diagram PT Semen Padang

A-296 kVA

L.Extraction
1365 kVA

L.Cemen Silo
1365 kVA



Single Line Diagram PT. Semen Padang

Coupler 3

Open

Kabel SS.5K1 COALMILL ID

CB SS.5K1

OCR

CB INC SS.5K1

OCR

BUS 5K1 COALMILL ID FAN
6,3 kV

Kabel SS.5R2 RAWMILL ID

CB SS.5R2

OCR

CB INC SS.5R2

OCR

BUS 5R2 RAWMILL ID FAN
6,3 kV

CB-5K1M02-CMD

OCR

CB-5K1M01-CMF

OCR

CB CM

OCR

Bus155
6,3 kV

TR 3 CM
2000 kVA

LVCB SCM

Bus3-14
0,4 kV

CM S
1165 kVA

CB-5R2M01-RMF

OCR

CB-5R2M02-RMD

OCR

TR.5R2DIST-RM
1000 kVA

LVCB-5R2DIST-RM

Bus3-16
0,4 kV

5R2DIST-RM
600 kVA

Bus5-19
6,3 kV

CAP3-19

5R2M02-RMD
2900 kW

SW5-19

Bus7-5
6,3 kV

CAP5-5

5R2M01-RMF
2900 kW

Bus5-17
6,3 kV

SW5-17

Bus5-17
6,3 kV

SW11-17

5K1M02-CMD
2708 kvar

CAP3-17

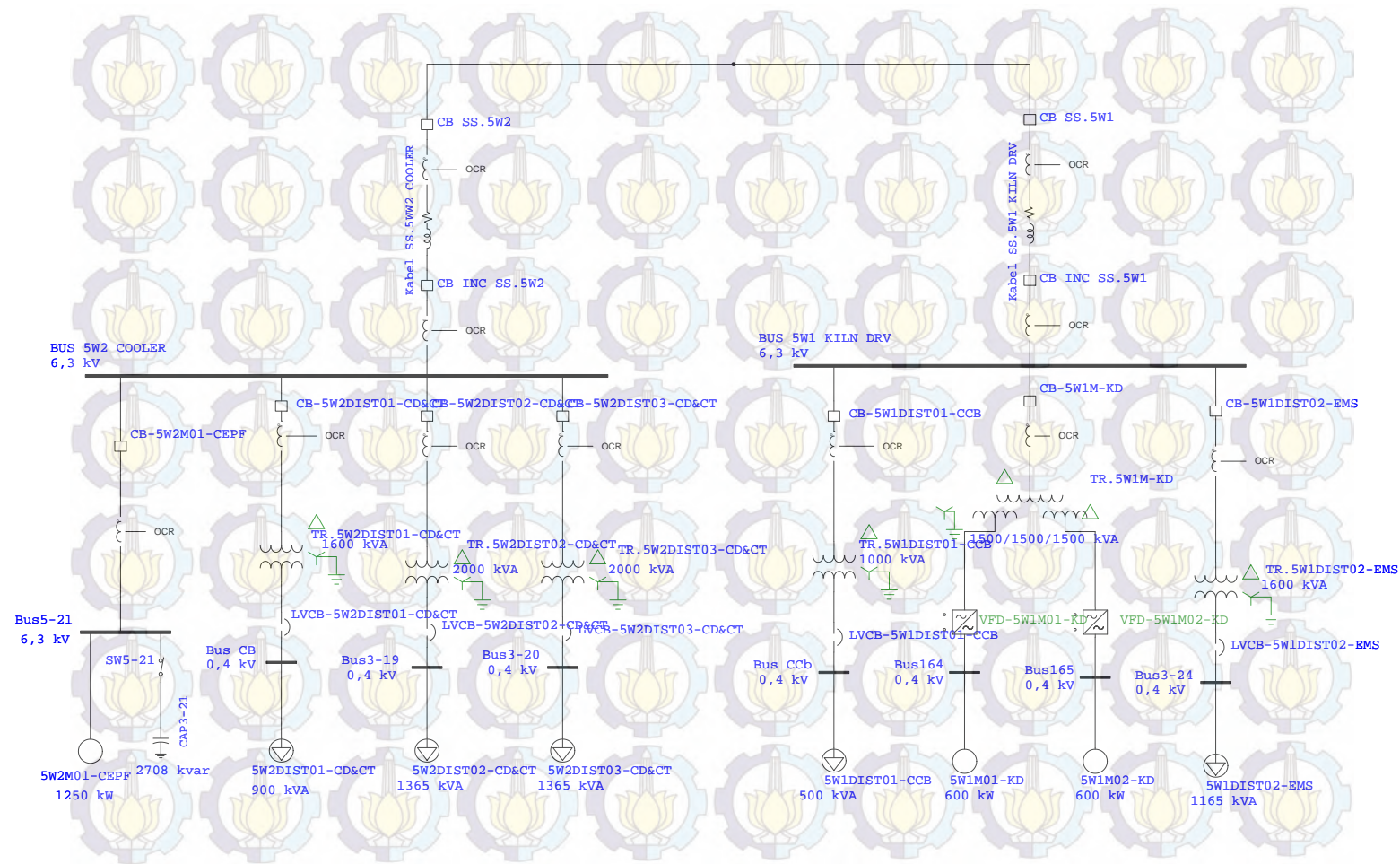
SW11-3

CAP5-3

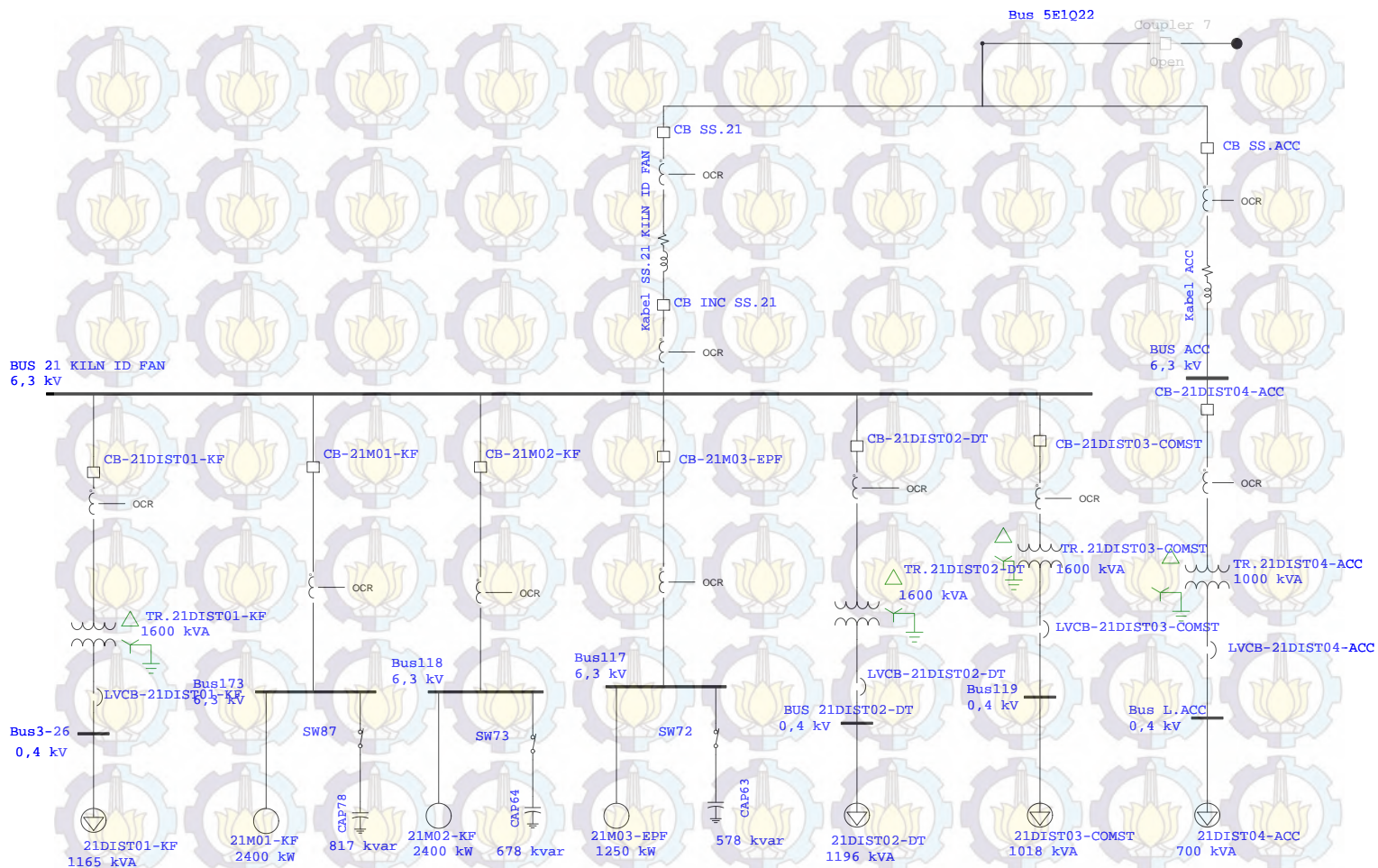
5K1M01-CMF
750 kW

Bus7-3
6,3 kV

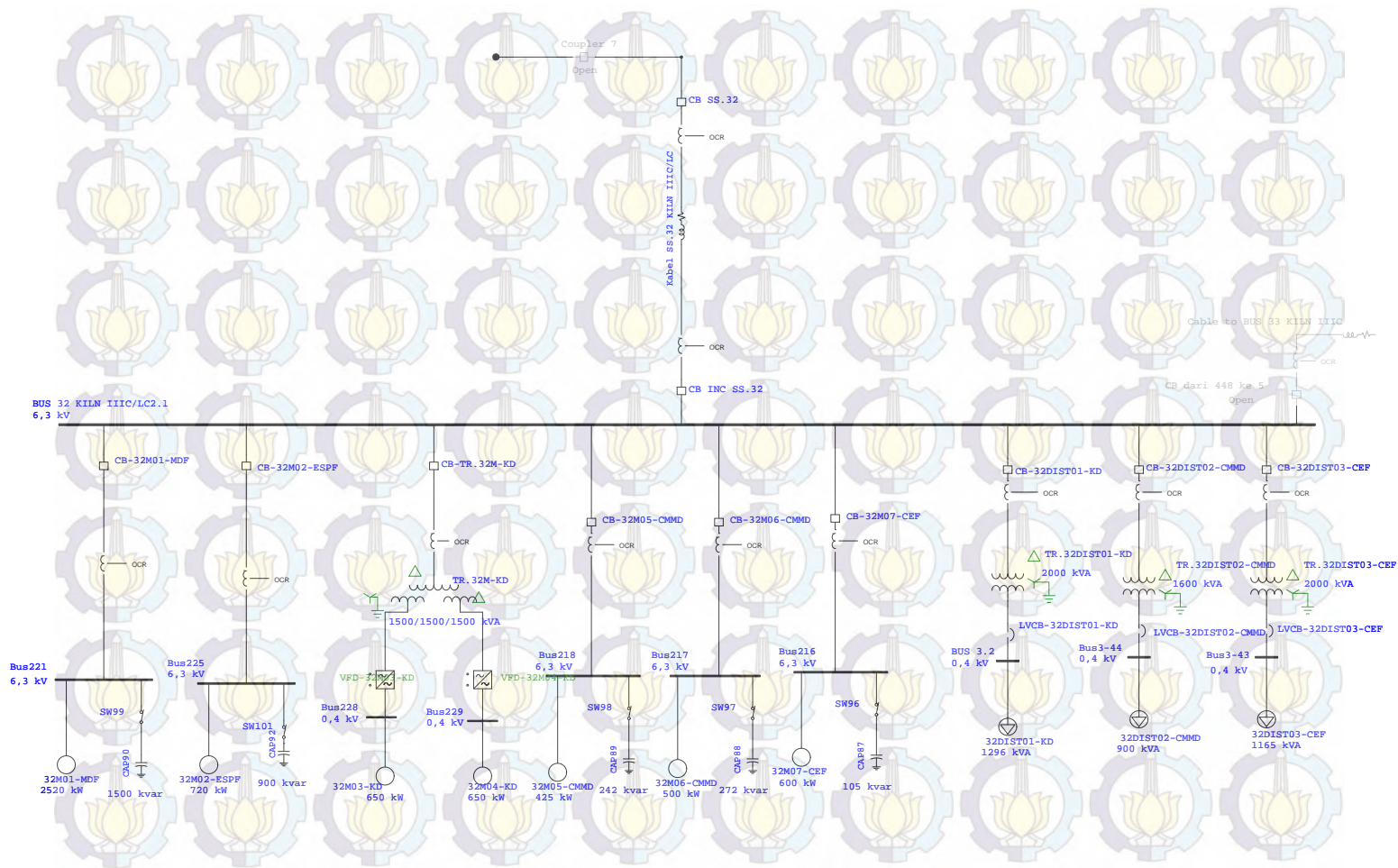
Single Line Diagram PT. Semen Padang



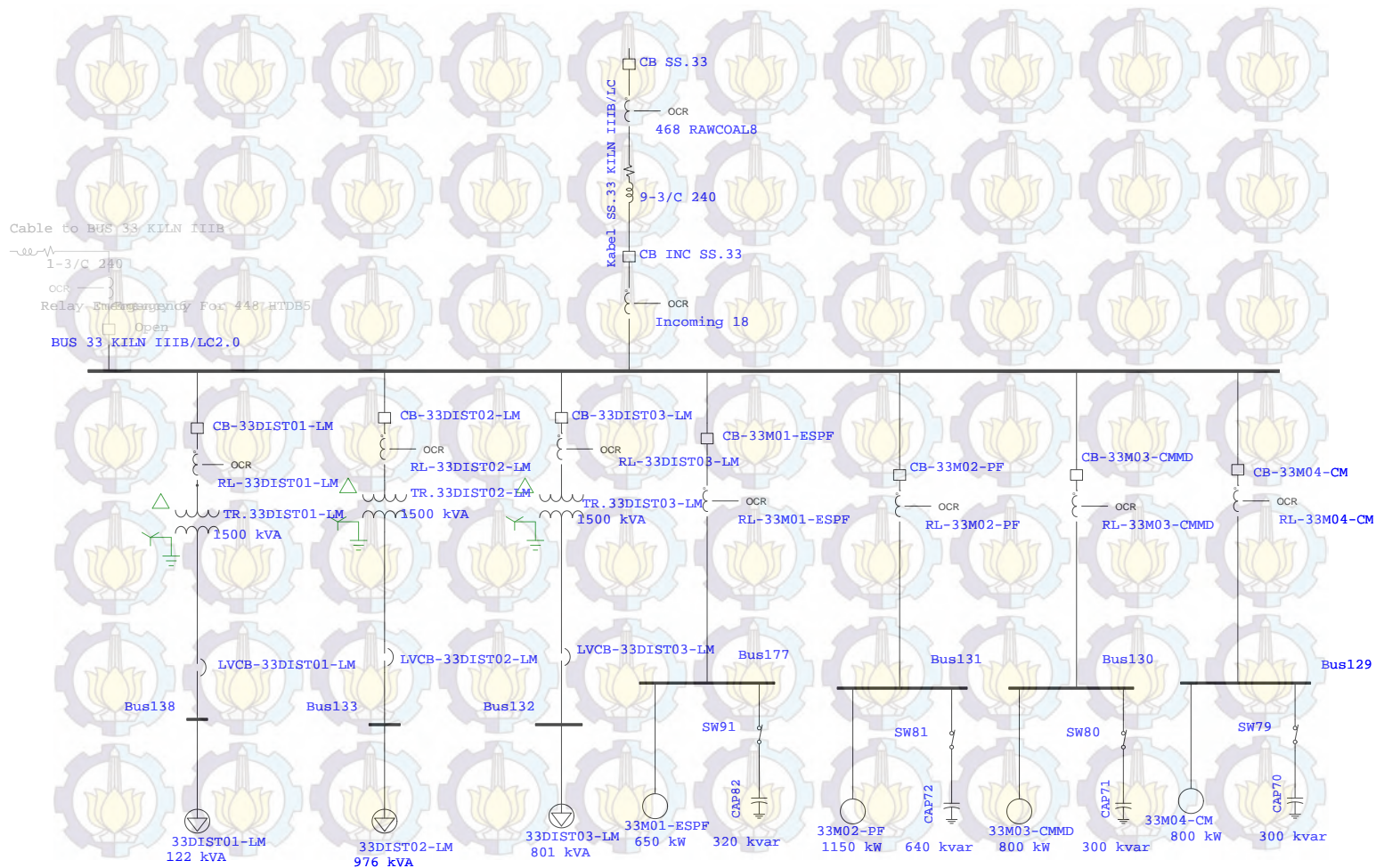
Single Line Diagram PT. Semen Padang



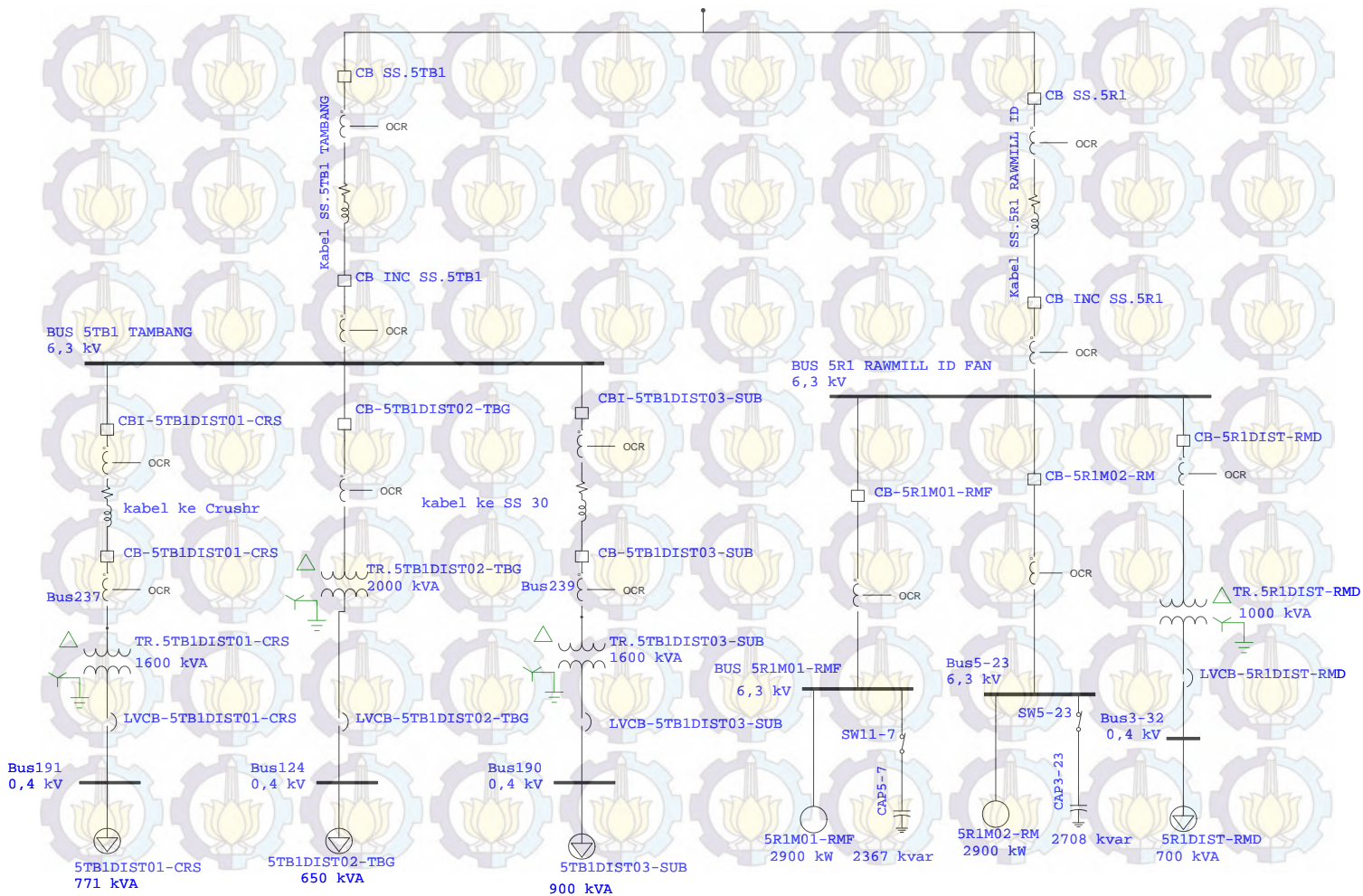
Single Line Diagram PT. Semen Padang



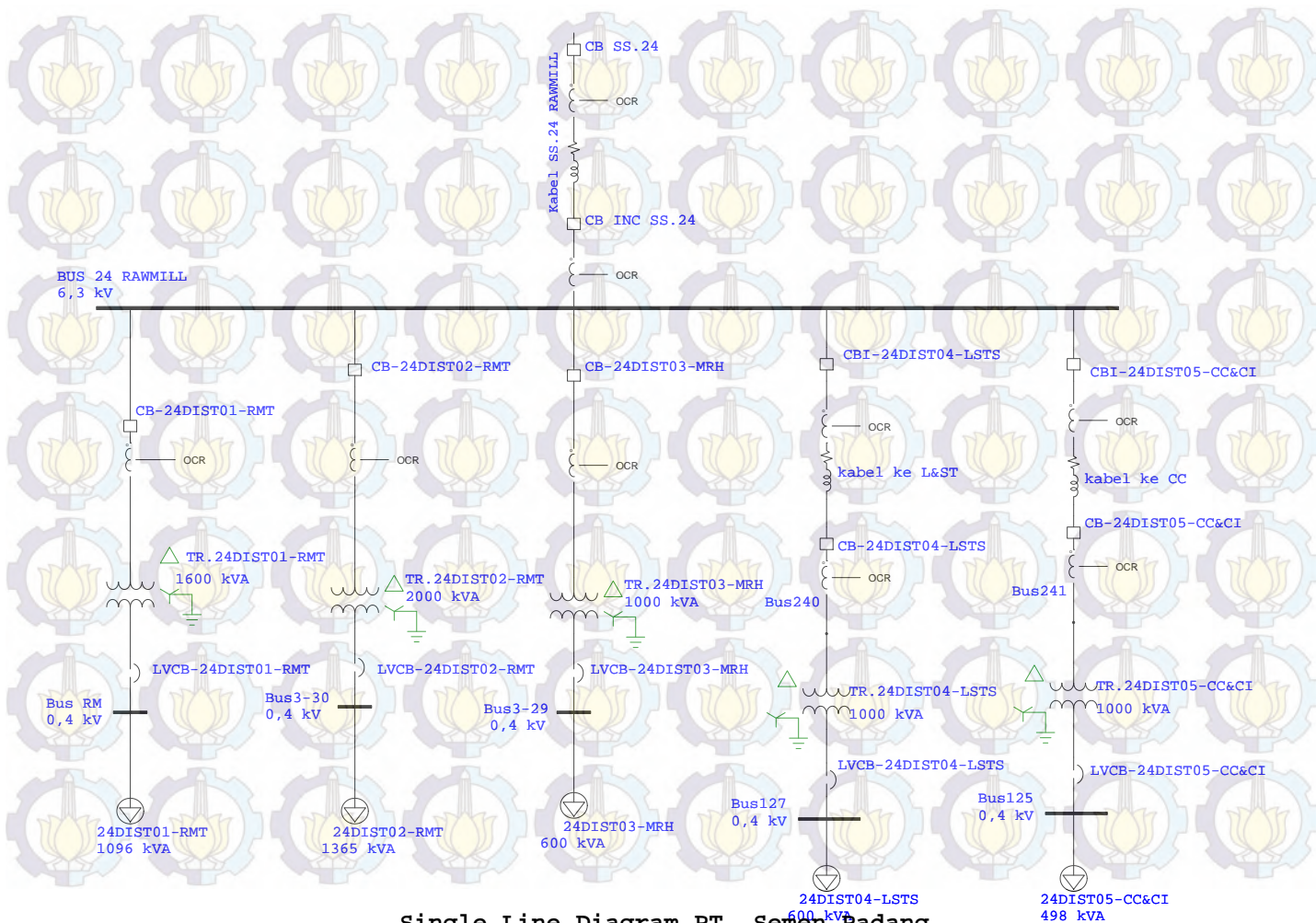
Single Line Diagram PT. Semen Padang



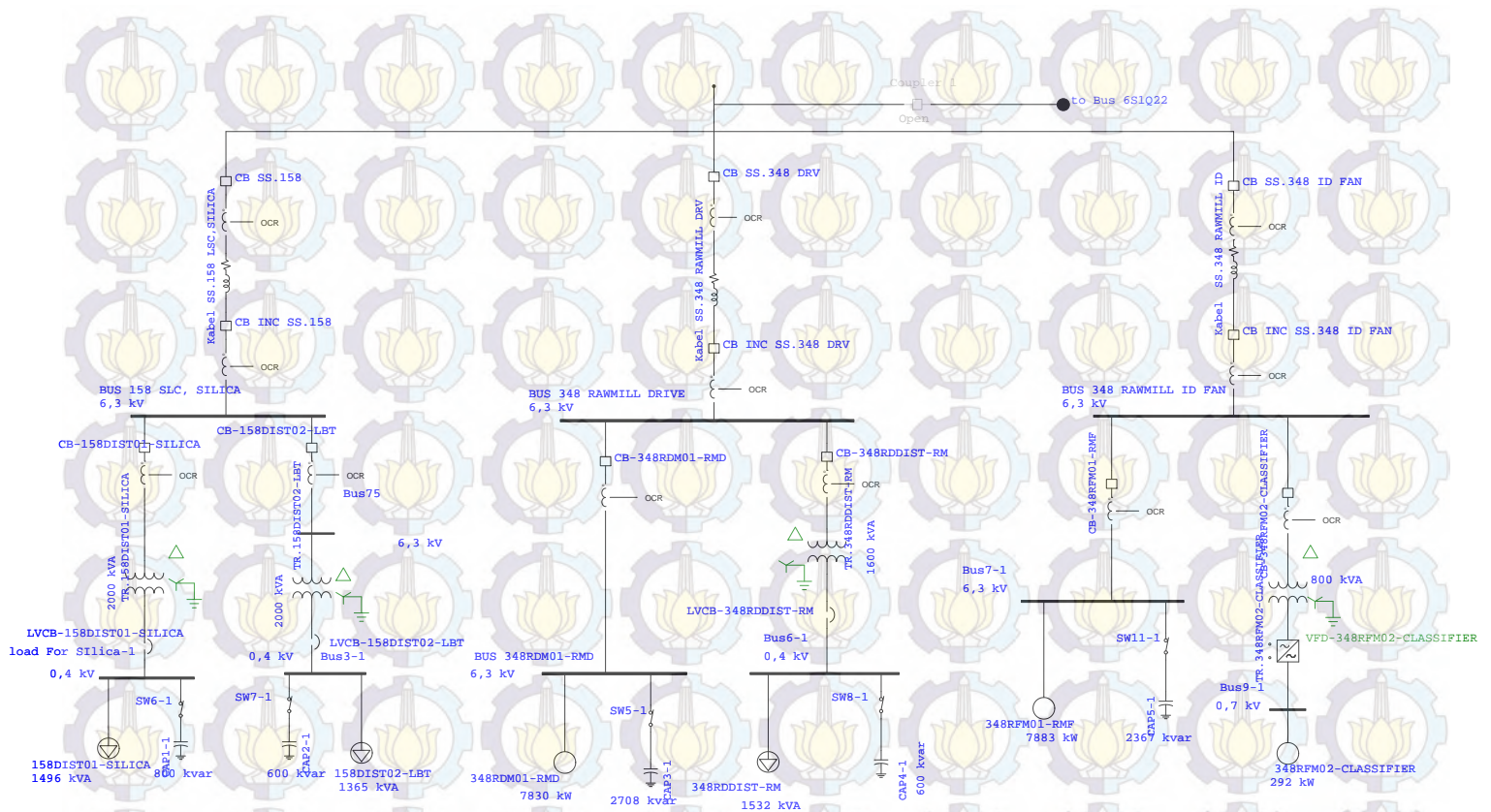
Single Line Diagram PT. Semen Padang



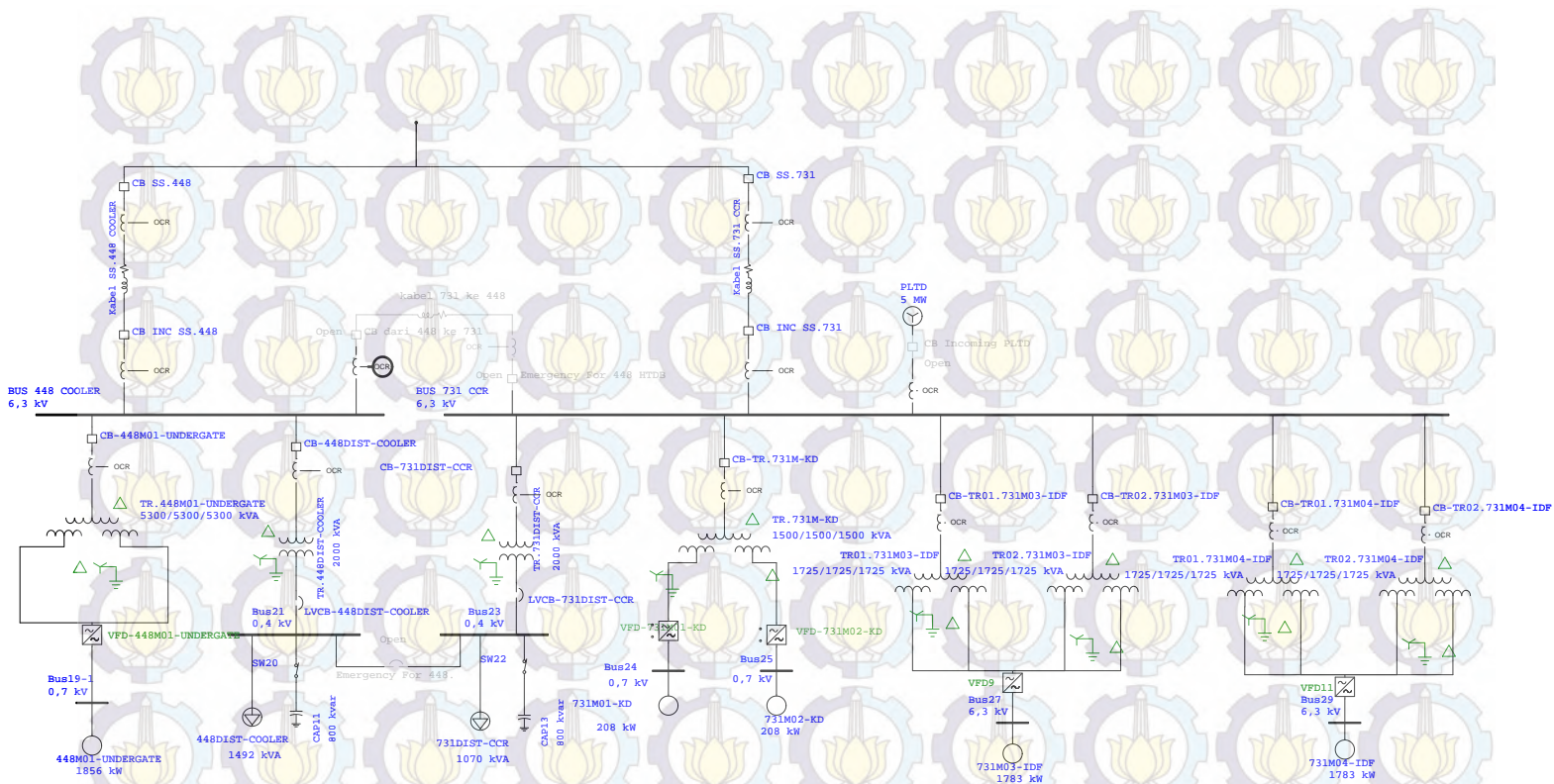
Single Line Diagram PT. Semen Padang



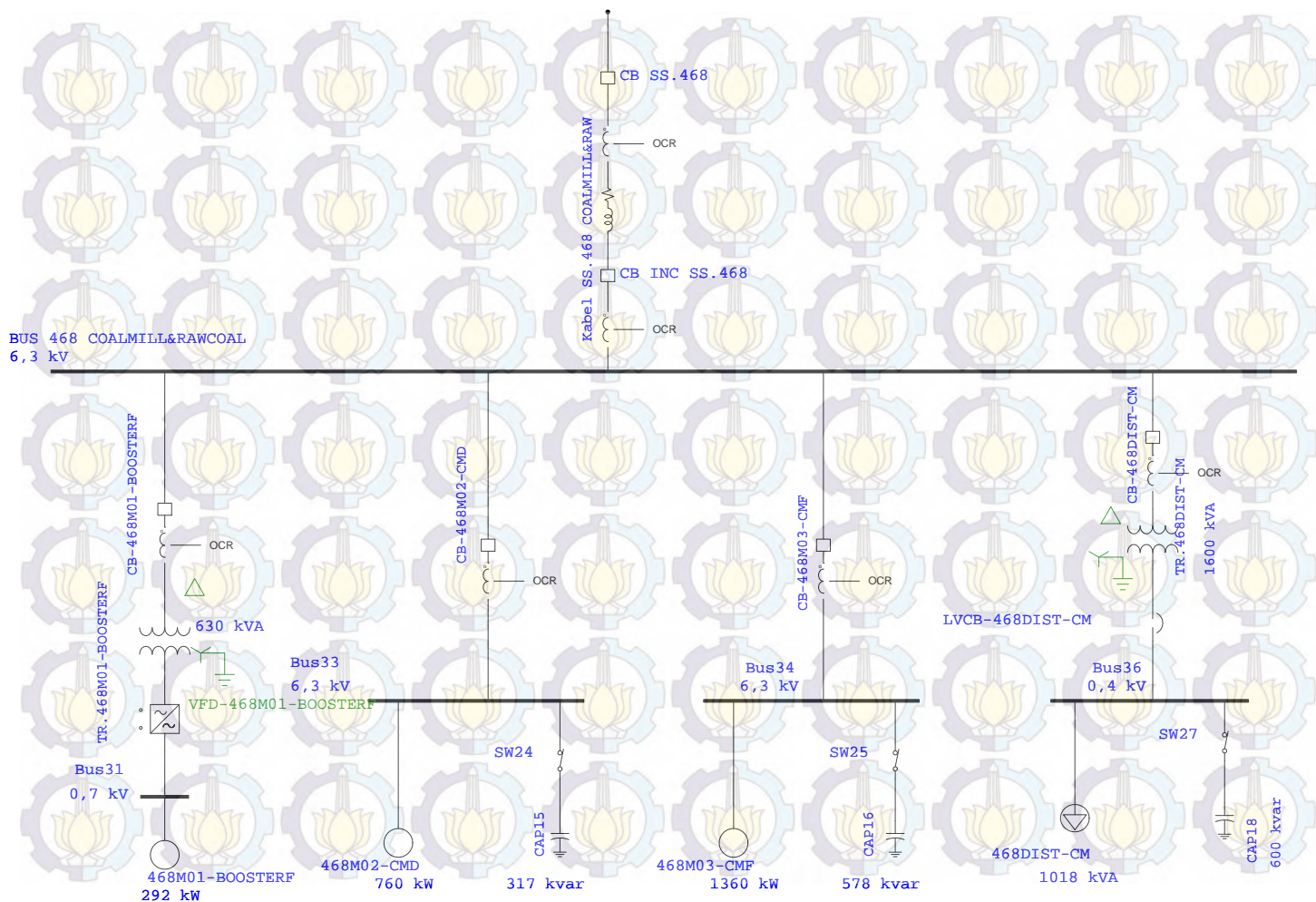
Single Line Diagram PT. Semen Padang



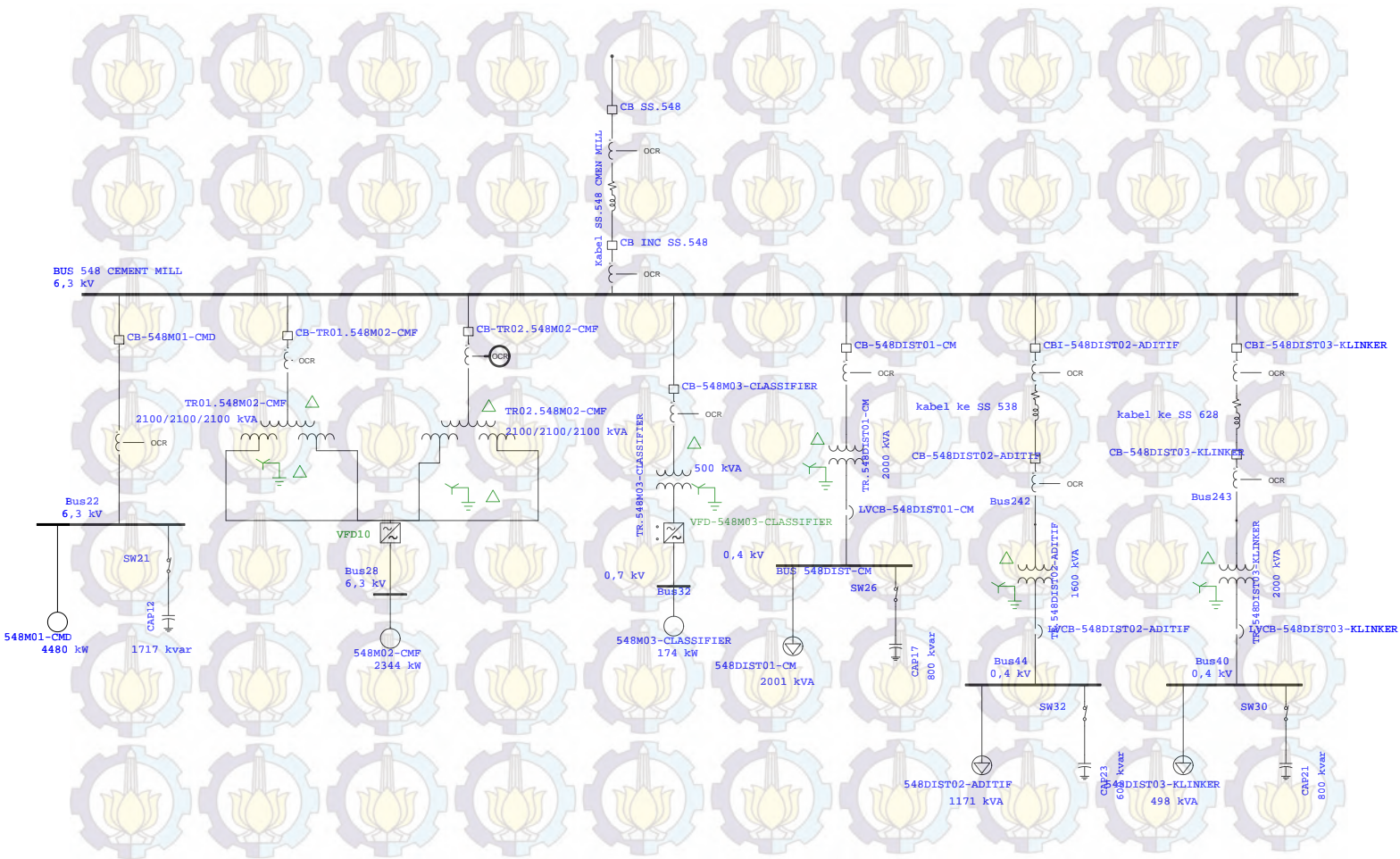
Single Line Diagram PT. Semen Padang



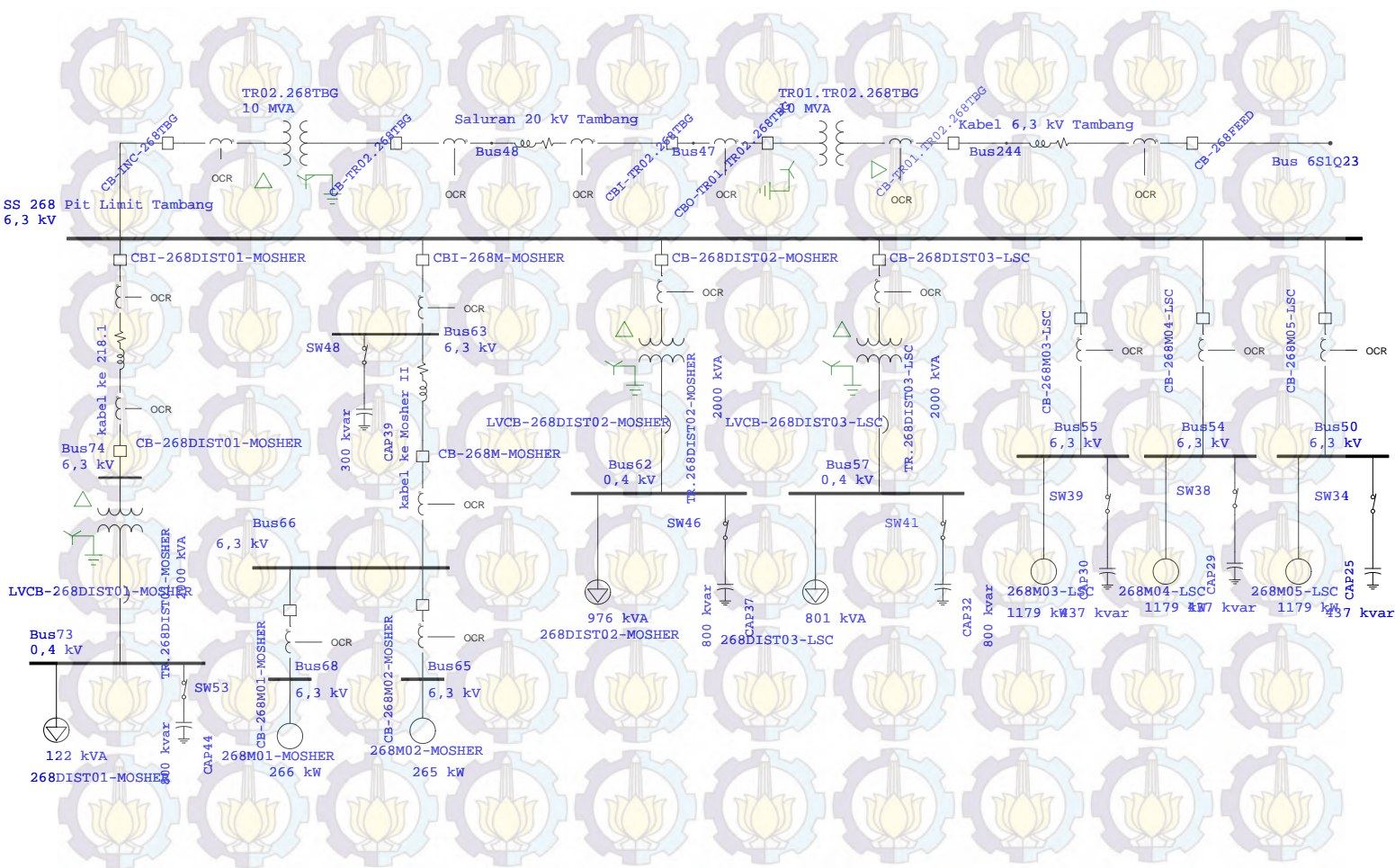
Single Line Diagram PT. Semen Padang



Single Line Diagram PT. Semen Padang



Single Line Diagram PT. Semen Padang



Single Line Diagram PT. Semen Padang

BIOGRAFI



Jumaras Situngkir terlahir sebagai anak terakhir dari lima bersaudara di Tanjung Kuba, Asahan pada tanggal 21 September 1991. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA BOPKRI 2 Yogyakarta tahun 2009. Penulis melanjutkan dan menyelesaikan pendidikan diploma (D3) pada bidang Teknik Listrik Vokasi Elektro Universitas Gadjah Mada tahun 2013. Tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan sarjana (S1) pada bidang Teknik Sistem Tenaga Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis dapat dihubungi melalui email cinink7st@gmail.com

